RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Gruppo di lavoro Mille600: repertorio dati per un reattore PWR come caso di esercizio per codici di analisi di sicurezza e di PSA

F. De Rosa, M. Sangiorgi, P. Turroni, M. Ciotti, A. Campreder, S. Paci, F. Mascari, G. Vella, A. Naviglio, D. Vitale di Maio, M. Adorni

Report RdS/2011/88

GRUPPO DI LAVORO MILLE600: REPERTORIO DATI PER UN REATTORE PWR COME CASO DI ESERCIZIO PER CODICI DI ANALISI DI SICUREZZA E DI PSA

F. De Rosa, M. Sangiorgi, P. Turroni, M. Ciotti – ENEA, A. Campedrer, S. Paci – CIRTEN, F. Mascari, G. Vella – Università di Palermo, A. Naviglio, D. Vitale di Maio – Università La Sapienza, M. Adorni – GRNSPG S. Piero a Grado

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico
Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA
Area: Governo, Gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale
Progetto: Nuovo nucleare da fissione: collaborazioni internazionali e sviluppo competenze in materia nucleare

Responsabile Progetto: Paride Meloni, ENEA

Titolo

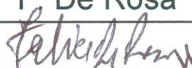
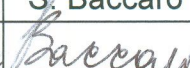
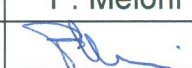
Gruppo di Lavoro MILLE600: Repertorio dati per un reattore PWR come caso di esercizio per codici di analisi di sicurezza e di PSA

Descrittori

Tipologia del documento: **Rapporto Tecnico**

Collocazione contrattuale: Accordo di Programma ENEA-MSE: Tema di Ricerca "Nuovo Nucleare da Fissione"

Argomenti trattati: Impianti nucleari di tipo evolutivo (GEN III+)
Neutronica
Termofluidodinamica
Controllo del Reattore

Sommario

Nell'ambito dell'Accordo di Programma ENEA - Ministero dello Sviluppo Economico e dell'Accordo di Programma ERSE (ENEA - Ricerca sul Sistema Elettrico) - Ministero dello Sviluppo Economico, è stato creato un gruppo di lavoro specialistico finalizzato alla rivitalizzazione in Italia delle competenze in materia nucleare, con particolare attenzione agli aspetti di sicurezza. Questo gruppo, che ha assunto la denominazione di "Gruppo di Lavoro MILLE600", è coordinato da ENEA UTFISSM con ERSE che funge da Segretario Scientifico.

In questo documento sono descritte le principali caratteristiche di una generica centrale elettronucleare di potenza, basata su un reattore PWR da 1600 MWe di ultima generazione. In particolare, il documento contiene dati utili alla realizzazione e al collaudo di modelli di calcolo e simulazione, nonché all'allestimento di studi teorici e sperimentali, autoconsistenti e confrontabili, da parte di università ed istituzioni di ricerca.

Note

Alla realizzazione di questo documento hanno collaborato ENEA (F. De Rosa, M. Sangiorgi, P. Turroni, M. Ciotti) e CIRTEN, in particolare l'Università di Pisa (A. Campedrer, S. Paci) , di Palermo (F. Mascari, G. Vella), di Roma "La Sapienza" (A. Naviglio, D. Vitale di Maio) e il Gruppo GRNSPG di San Piero a Grado (M. Adorni).

CIRTEN - CONSORZIO INTERUNIVERSITARIO PER LA RICERCA TECNOLOGICA NUCLEARE

Copia n. **In carico a:**

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	08/09/2011	NOME	F. De Rosa	S. Baccaro	P. Meloni
			FIRMA	[signature]	[signature]	[signature]
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE

Sommario

1 Scopo del lavoro

Nell'ambito dell'Accordo di Programma ENEA - Ministero dello Sviluppo Economico e dell'Accordo di Programma ERSE (ENEA - Ricerca sul Sistema Elettrico) - Ministero dello Sviluppo Economico, è stato creato un gruppo di lavoro specialistico finalizzato alla rivitalizzazione in Italia delle competenze in materia nucleare, con particolare attenzione agli aspetti di sicurezza.

Questo gruppo, che ha assunto la denominazione di "Gruppo di Lavoro MILLE600", è coordinato da ENEA UTFISSM con ERSE che funge da Segretario Scientifico.

L'obiettivo del GdL MILLE600 è la realizzazione di un documento tecnico contenente dati ed informazioni utili per chi fosse intenzionato ad intraprendere lavori di simulazione con codici e calcoli per la realizzazione di un progetto di massima di un reattore nucleare di III generazione avanzata ad acqua leggera in pressione.

In questo documento sono descritte le principali caratteristiche di una generica centrale elettronucleare di potenza, basata su un reattore PWR da 1600 MWe di ultima generazione. In particolare, il documento contiene dati utili alla realizzazione e al collaudo di modelli di calcolo e simulazione, nonché all'allestimento di studi teorici e sperimentali, autoconsistenti e confrontabili, da parte di università ed istituzioni di ricerca.

I dati impiantistici contenuti nel documento rappresentano una ragionevole approssimazione di dati costruttivi di dominio pubblico, liberi da diritti intellettuali, ricavati attraverso stime ingegneristiche. Essi non possono essere presi a riferimento per analisi di licensing in quanto non collegabili direttamente ad un progetto reale ed ai suoi dettagli o varianti.

Alla realizzazione di questo documento hanno collaborato ENEA e CIRTEN, in particolare l'Università di Pisa, di Palermo, di Roma "La Sapienza" e il Gruppo GRNSPG di San Piero a Grado.

2 Formazione del GdL Mill600 in ambito aperto nazionale di contributori e allargato come utenti di futuro esercizio

A valle di accordi preliminari di collaborazione tra ENEA FIS-NUC ed ERSE sul tema della sicurezza nucleare, era stato presentato ai colleghi di ENEA il programma di attività di ERSE relativo al Progetto Nucleare e, in particolare, alle ricerche sugli aspetti di sicurezza che fanno riferimento ad Dipartimento Sistemi di Generazione – Gruppo di Ricerca Impianti Nucleari e Sicurezza. Ciò è avvenuto durante i due incontri del 18 Novembre 2009 e del 10 Dicembre 2009 presso gli uffici di ERSE.

I due documenti di riferimento per questa collaborazione tra ENEA FIS NUC ed ERSE sono:

- Accordo di Programma ENEA-MiSE – Linea Progettuale 5;
- Accordo di Programma ERSE-MiSE.

Al GdL Mille600 hanno potuto aderire, su invito di ENEA e/o ERSE, altri soggetti italiani operanti nel settore della ricerca, dell'università, della costruzione e della gestione di impianti nucleari.

Il 3 febbraio 2010 c'è stata una prima riunione formale presso la sede ERSE a cui hanno partecipato anche soggetti italiani operanti in settori di interesse per il nucleare civile, con lo scopo di presentare loro il progetto GdL MILLE600 ed istituire il primo nucleo di membri che ne avrebbero dato corpo.
Alla prima riunione hanno partecipato le seguenti organizzazioni:

- ENEL - Roma
- ENEL - Ingegneria e Innovazione - Pisa
- Università di Pisa
- Università Roma "La Sapienza"
- Università di Palermo
- Università di Bologna
- ENEA - Bologna
- ERSE

Altre organizzazioni hanno invece espresso interesse nel progetto nonostante non fossero presenti a questa prima riunione:

- SOGIN
- ISPRA

L'invito è stato sucessivamente esteso ad altre organizzazioni del settore industriale:

- Mangiarotti Nuclear
- Ansaldo Nucleare

ENEA ha accettato di coordinare l'iniziativa in oggetto, integrandola con azioni

analoghe svolte in ambito nazionale, come ad esempio quella avviata tra ENEA e CIRTEN.

Il 27 Aprile 2010 si è tenuta presso la sede ENEA di Bologna una seconda riunione con lo scopo di dare il via alle attività previste, chiedendo ai nuovi ed attuali partecipanti di confermare e mantenere i propri impegni.

I vari partecipanti al GdL si sono quindi riuniti periodicamente per fare il punto sullo stato di avanzamento lavori e la previsione degli impegni futuri.

Data e luogo delle successive riunioni:

24 giugno 2010	MILANO\ sede ERSE
30 settembre 2010	PISA\Università
10 dicembre 2010	PALERMO\Università
31 marzo 2011	ROMA\Università La Sapienza
9 maggio 2011	BOLOGNA\sede ENEA
27 giugno 2011	MILANO\ sede RSE

Nel frattempo che il progetto proseguiva si sono verificati vari eventi e mutamenti:

- Durante l'intervallo di tempo trascorso tra la riunione del 24/6/2010 e del 30/9/2010, ERSE ha cambiato statuto sociale ridenominandosi RSE Ricerca sul Sistema Energetico e divenendo partecipata totalmente da capitale pubblico il cui Socio unico è GSE S.p.A Gestore del Sistema Elettrico.
- ENEA si è riorganizzata in varie unità tecniche e il laboratorio FIS-NUC si è ridenominato UTFISSM-SICSIS.
- Referendum del 12 e 13 giugno 2011 per la «Abrogazione delle nuove norme che consentono la produzione nel territorio nazionale di energia elettrica nucleare»

3 Struttura e organizzazione del documento

Il documento finale avrà un struttura a schede. Un indice preliminare di questo documento, con l'attribuzione delle relative responsabilità, è riportato in seguito.

1. CARATTERISTICHE GENERALI DELL'IMPIANTO *(ENEA, RSE)*

2. NOCCIOLO DEL REATTORE E GESTIONE DEL COMBUSTIBILE *(RSE, UniPa-DIN, UniRoma, ENEA, UniPisa-GRNSPG)*
   2.1. Caratteristiche generali
   2.2. Dati barra di combustibile
   2.3. Dati elemento di combustibile
   2.4. Composizione vettore plutonio per mox
   2.5. Barre di controllo
   2.6. Dati riflettori
   2.7. Griglie spaziatrici
   2.8. Mappa primo caricamento

3. VESSEL E CIRCUITO PRIMARIO *(ENEA, UniPa-DIN, Uni-Roma)*
   3.1. Reactor Coolant System and Connected Systems Description
   3.2. RCS components: Reactor pressure vessel
   3.3. Control rod drive mechanisms;
   3.4. Reactor coolant pumps;
   3.5. Reactor coolant piping ;
   3.6. Pressurizer;
   3.7. Pressurizer relief tank;
   3.8. Post-accident high point vents;
   3.9. Pressurizer safety relief valves;
   3.10. Component supports and restraints.
   3.11. Connected systems: SIS/RHR

4. GENERATORI DI VAPORE *(RSE, UniPa-DIN, UniRoma)*

5. CIRCUITO SECONDARIO *(ENEA, RSE)*

6. EDIFICIO DI CONTENIMENTO *(ENEA, UniBo, RSE)*

7. SISTEMI DI EMERGENZA *(ENEA, CIRTEN/UniPisa-DIMNP, RSE, UniPa-DIN, UniRoma)*
   7.1. Sistemi di emergenza del primario (SIS/RHR e IRWST)
   7.2. Containment HRS;
   7.3. Secondary containement;
   7.4. Containement Isolation System;
   7.5. Combustible Gas Control in Containment;
   7.6. Containment Leakage control;
   7.7. Fracture prevention of containment PV;
   7.8. Extra Borating System;

4 Descrizione generale del reattore Mille600

4.1 Progetti evolutivi di generazione III nello spirito di "Difesa in Profondità"

Mille600 è concepito come reattore PWR industriale di grande potenza (1600 MWe) secondo un progetto evolutivo derivato dai reattori PWR attualmente in esercizio in Europa, nonchè dal progetto PUN, congelato allo stato di progetto avanzato nel 1986 in Italia prima che la moratoria nazionale sulle realizzazioni nucleari seguita alle vicende di Chernobil ne precludessero la strada per una sua realizzazione. Si ricorda semplicemente che i reattori di tipo PWR sono reattori che ricorrono ad acqua pressurizzata (nella sua composizione isotopica naturale quindi definita "acqua leggera" in contrapposizione a "acqua pesante" dove l'acqua nella sua formula chimica sostituisce l'Idrogeno con il suo isotopo naturale più pesante Deuterio) sia come fluido moderatore neutronico sia come refrigerante del nocciolo. Nei reattori PWR l'acqua a diretto contatto del nocciolo è mantenuta all'interno di un circuito chiuso, "Circuito Principale" costituito dal contenitore del nocciolo, ovvero il Vessel, e dalle sue diramazioni circuitali che portano questa acqua a scambiare calore con altra acqua di un circuito separato più esterno "Circuito Secondario". In un PWR, diversamente da quanto avviene in un BWR, l'altra principale filiera di reattori ad "acqua leggera" diffusa in Europa e nel mondo, l'acqua in pressione che, partendo in forma di vapore dal Generatore di Vapore (GV) stesso viene avviata al ciclo di trasformazione termodinamica con la espansione in turbina seguita da condensazione e riciclata poi con una pompa nuovamente al GV è quella del circuito secondario che non vede direttamente il nocciolo e quindi è esente in generale dei prodotti di fissione eventualmente rilasciati da rotture sporadiche di guaine combustibile .

Il concetto di Mille600 si pone in linea astratta nella prospettiva di un progetto di reattore PWR di III generazione allo scopo di costituire un insieme di dati coerenti utili per fini accademici di studio e benchmark di codici per analisi di scenari incidentali e di sicurezza traendo spunto in maniera evolutiva da reattori già vagliati attraverso una elevata esperienza di realizzazione ed esercizio in Europa Occidentale quali sono i reattori PWR di tipo N4 di produzione francese e Konvoi di produzione tedesca, e su un secondo piano anche dei reattori PWR di tipo Westinghouse di cui gli stessi N4 e Konvoi non sono che una filiazione operata in un contesto Europeo.

Il carattere evolutivo del concetto di Mille600 come quello di altri progetti veri e propri di reattore PWR evolutivi che hanno la firma di un costruttore ed hanno o perseguono il sigillo di una Autorità di Licenziamento per la costruzione (come EPR di Areva o AP1000 di Westinghouse fino a VVER di Atomenergoproekt) è determinato dal fatto che fondamentalmente le scelte progettuali e realizzative derivano da impianti precursori che hanno accumulato un consistente esperienza di esercizio per cui: l'architettura dell'impianto; la scelta degli aspetti costruttivi dei componenti fondamentali; la scelta dei materiali e della loro durabilità nel corso della vita operativa; la conoscenza delle reali modalità operative dei complessi circuiti con flussi di materiali ed energia; le necessità di monitoraggio dei parametri di operazione e le tutele di affidabilità dei componenti e parti di impianto da garantire con controlli ed

ispezioni periodici sono tutti portati a sintesi ed implementate nel nuovo progetto con un grado di innovazione che riflette le sempre più aggiornate esigenze di tutela della sicurezza per la popolazione e la capacità di penetrazione industriale.

Il progetto di un reattore nucleare evoluto ad una generazione successiva rispetto a quelli oggi operanti e quindi progettati oltre una decina di anni fa, non può eludere il concetto di "difesa in profondità" che è venuto maturandosi come approccio fondamentale nella sicurezza dei Reattori Nucleari. In grossa sintesi questo approccio impone l'adozione di una serie di "fronti di difesa" in successione rispetto al rischio di danni alla salute degli operatori e della popolazione che si estrinsecano in cinque diverse attitudini operative da adottare tutte nel processo completo di progettazione realizzazione e conduzione dell'impianto nucleare. Di questi "fronti di difesa" gli ultimi tre livelli riguardano rispettivamente: l'implementazione di scelte di progetto di dispositivi di sicurezza a mitigazione ed inibizione della sequenza di incidente derivante da eventi iniziatori assunti in modo deterministico come basi di progetto; la mitigazione con risorse impiantistiche aggiuntive delle conseguenze di incidenti severi assunti anche oltre le condizioni di progetto e capacità di gestione in soccorso alle funzioni di contenimento della barriera fisica più estrema; capacità di attuazione di piani intervento di emergenza in aree esterne al sito.
Si sfa osservare che mentre sull'ultimo dei livelli di difesa più che le scelte di progetto impiantistico hanno un ruolo la scelta del sito e la buona organizzazione ed esercizio delle responsabilità decisionali ed operative articolate sul piano tipico di ambito territoriale civile, sui due livelli più interni son proprio le scelte di progetto impiantistico oltre che la capacità degli operatori di impianto ad assumere un ruolo importante.
É anche in questa chiave di lettura che si cercherà dare qui descrizione generale del reattore Mille600.

4.2 Reattore Mille600

Il nodo principale di tutto l'impianto ovvero il Nocciolo radioattivo del reattore, risiede all'interno del Vessel. All'interno di questo primo fondamentale contenitore cilindrico di metallo di forte spessore sono anche presenti oltre al nocciolo con i suoi elementi di combustibile nucleare i componenti interni che servono a garantire un assetto strutturale sicuro del nocciolo come il "Barrel" ovvero un mantello cilindrico che sorretto alla sua estremità superiore tramite una flangia di supporto interno al vessel, sul fondo porta la griglia di supporto degli elementi del nocciolo che vi risiede all'interno. Sempre all'interno di questo mantello di supporto nocciolo sono disposte piastre anulari di acciaio accatastate una sopra l'altra e conformate in modo sposare i diversi profili radiali del nocciolo e del mantello fungono da riflettente neutronico migliorando il bruciamento del combustibile nucleare e proteggendo da questo irraggiamento la parete del vessel. Come soluzione evolutiva nel progetto del Vessel vanno segnalate la scelta del materiale (Acciaio ferritico rivestito internamente con uno strato in austenitico) e la scelta delle modalità realizzative (anuli e calotte di chiusura come singoli forgiati, con sodature di unione solamente circonferenziali) e la conformazione con penetrazioni laterali del circuito primario riportate sull'elemento forgiato anulare superiore che include la flangia di chiusura della calotta superiore e

penetrazioni assiali esclusivamente riportate sulla calotta superiore senza altre penetrazioni a livello inferiore suscettibili da avvicinare il livello eventuale residuo di acqua nel vessel in caso di rottura accidentale (LOCA). I meccanismi di movimentazione delle barre di controllo del nocciolo applicano azionanti in penetrazione dall'alto e sono posizionate sulla calotta superiore.
L'acqua contenuta nel Vessel che attraversa il Nocciolo viene circolata attraverso quattro circuiti chiusi paralleli che si diramano dal Vessel dotati ognuno di un Generatore di Vapore e di una Pompa di circolazione. L'acqua nel Vessel e nei quattro circuiti è mantenuta in fase liquida ad alta pressione tramite un unico Pressurizzatore connesso ad un ramo dei quattro circuiti. Il Pressurizzatore espleta la funzione di "vaso di compensazione" mantenendo al suo interno un livello variabile di separazione di fase liquida e di fase vapore dall'acqua secondo opportuni volumi. Nell'insieme questi quattro circuiti con il Vessel ed il Pressurizzatore costituiscono appunto il Circuito Principale.
La scelta della configurazione del nocciolo e della sua flessibilità come gestione del combustibile, la scelta data a certe caratteristiche architetturali del Circuito Principale quali la separatezza in moduli indipendenti ridondanti nel principio uno su quattro, la scelta di ridurrei giunti saldati in numero ed in posizioni meno esposti ad una evoluzione grave della sequenza incidentale in caso di rottura va intesa come evoluzione del progetto nello spirito della "Difesa in Profondità" in attuazione di quello che viene inteso come il "terzo livello" di fronte di difesa. Anche la taglia e l'architettura dei grandi componenti del Circuito Principale e la scelta dei materiali che fondamentalmente tendono ad espandere i margini delle condizioni operative, la considerazione per l'accessibilità ad ispezioni e manutenzioni in servizio tendono in generale a ridurre le condizioni di comportamento incidentale e vanno annoverati tra i provvedimenti evolutivi nel principio della "Difesa in Profondità" su fronti di difesa anche più interni [1].

4.3 Il Contenitore principale e gli edifici dell'Isola Nucleare

Poiché la prima sostanziale barriera fisica di contenimento delle sostanze radioattive che vengono generate nel processo di fissione del nocciolo è rappresentata dalle guaine delle barrette di combustibile, tutto il Circuito Principale rappresenta la seconda delle barriere fisiche di contenimento pur presentando qualche apertura verso circuiti di sistemi con funzioni specifiche ed indispensabili per la sicurezza i quali per questo assurgeranno ad un pari grado di attenzione nelle loro funzioni di contenimento con adeguati margini nel loro dimensionamento, cure nella loro realizzazione , rigore nei controlli, e in ogni caso provvisti valvole di isolamento con le opportune ridondanze. I Generatori di Vapore, grandi corpi cilindrici allungati in assetto verticale con una

[1] *Nota Bene: il concetto di "difesa in profondità" deriva dalla strategia militare dove la difesa va attuata a favore di un punto di "arroccamento" interno rispetto aggressioni esterne e quindi il fronte di difesa limite interno è l'ultima difesa. Invece nel nostro caso la difesa va attuata a favore di un ambiente esterno al sito di centrale da cui possono originarsi aggressioni quindi il limite di difesa ultimo in questo caso sarà il limite più esterno.*

espansione radiale in testa, rappresentano i punti di connessione funzionale del Circuito Principale con il Circuito Secondario.
Il Circuito Principale a sua volta con tutti i suoi grandi componenti è alloggiato all'interno di un grande edificio che rappresenta una terza importante barriera di contenimento. Questo edificio rappresenta il Contenitore Principale che nel nostro caso è concepito come corpo centrale della grande Isola Nucleare costruito in cemento armato di grande spessore provvisto di una fitta trama di tiranti di prepensionamento. Lo stesso edificio è provvisto internamente di una ricopertura assolutamente continua con un mantello di acciaio che pur non assumendo alcun ruolo strutturale assicura la tenuta stagna della atmosfera interna, esternamente è protetto da una ulteriore spessa parete in cemento armato che realizza un corridoio anulare di separazione tra le due pareti agibile per le vie cavi e condotti di servizio per gli impianti interni le ispezioni e il monitoraggio delle perdite di contenimento in corrispondenza delle varie penetrazioni. Il volume interno del Contenitore Principale oltre a contenere i grossi componenti del Circuito Principale dispone di locali vie di accesso e dispositivi per le operazioni di montaggio, di apertura della calotta superiore del vessel per le operazione di manutenzione degli elementi del nocciolo, di ispezione e riparazione, di smontaggio sostituzione e riparazione dei componenti del Circuito Principale delle piscine stesse e vie di transito degli elementi combustibili in manutenzione verso l'Edificio Combustibile esterno e contiguo. La disposizione dei locali interni al Contenitore Principale quindi è molto articolata. In termini molto generali è disposto un basamento interno, separato dal grande basamento esterno dell'Isola Nucleare ma semplicemente appoggiato a tazza ad esso con il tramite della piastra di fondo che fornisce continuità di base al rivestimento metallico interno del contenitore. Su questo basamento interno si ancorano tutte le opere in cemento armato che delimitano i locali interni, che al centro vedono il "Pozzo Reattore" dove alloggia il Vessel appoggiato alle pareti di questo a in corrispondenza dei bocchelli di diramazione degli otto tratti di Circuito Principale che all'uopo sono provvisti di riscontri con rinforzo ai punti di appoggio. Ai due fianchi secondo una vista in pianta del Vessel e del Pozzo Reattore si diramano divisi in coppie le tratte dei quattro treni di Circuito Principale e si dispongono in locali individualmente separati ed opportunamente supportati i Generatori di Vapore e le Pompe. Avendo per convenzione definito i fianchi della nostra vista in pianta diremo che in posizione posteriore si sviluppano le vie, la piscina di transito e le aree di servizio per la manutenzione del combustibile. In corrispondenza, oltre la parete del contenitore si affaccia l'Edificio Combustibile. Anteriormente sempre internamente al Contenitore Principale trova alloggio il Pressurizzatore ed altri locali di servizio nonché le vie di accesso dei grossi componenti in manutenzione che danno ad un grande portellone di transito attraverso la barriera del Contenitore Principale, anteriormente oltre la parete si affacciano due dei quattro Edifici di Salvaguardia che fanno parte dell'Isola Nucleare, più oltre ancora fuori dall'Isola Nucleare l'edificio Turbina. Tornando ancora per un momento all'interno del Contenitore Principale e sganciandoci dalla vista in pianta diremo i locali dei componenti sono tutti aperti verso l'alto e sono tutti sovrastati da un Carro Ponte Polare che si appoggia a una mensola a corona sotto la cupola del contenitore, di capacità opportuna manutenzione dei grossi componenti con le opportune vie di corsa. Al livello più basso internamente al Contenitore sotto il fondo del pozzo reattore è disposta a corona la grande piscina di acqua che costituisce il Serbatoio Interno di

Acqua (IRWST). Questo serve nominalmente per l'allagamento dei locali delle vie di transito interne del combustibile in manutenzione, ma in definitiva svolge anche funzioni di sicurezza come riserva inestinguibile di acqua, grazie al recupero per drenaggio in caduta della stessa in un circuito chiuso interno, per il mantenimento del livello di acqua nel Vessel e per il raffreddamento del Contenitore in condizioni estreme. Sotto il fondo del Pozzo Reattore allo stesso livello circa del IRWST è anche posizionata la vasca di raccolta e di raffreddamento del Corium il "Core Catcher". Delle funzionalità del IRWST e del "Core Catcher" in condizioni estreme come quarto e penultimo fronte di difesa secondo il principio dei cinque fronti di "difesa in profondità" si dirà qui poco più avanti.
Come generale descrizione del Contenitore Principale e degli edifici dell'Isola Nucleare si rileva che i due Edifici di Salvaguardia disposti anteriormente in vista di pianta e l'Edifico Combustibile sono come, opera civile, strutturalmente continui con la parete di rivestimento esterno del Contenitore Principale, e che sul grande basamento esterno dell'Isola Nucleare insistono altri due Edifici di Salvaguardia disposti alle due ali ed un ulteriore edificio di sistemi Nucleari Ausiliari. Come commento finale giustificativo della scelta per la disposizione degli edifici si osserva che il grande blocco dei quattro edifici sull'asse centrale affiancato strettamente da ulteriori edifici costituiscono una intrinseca barriera di protezione del Contenitore Principale rispetto aggressioni da eventi esterni quali missili spinti da eventi naturali e impatto aereo, la seconda parete esterna del Contenitore Principale e il corridoio interno di separazione forniscono una ulteriore protezione da eventi esterni che lascia indenne la parete principale interna. Gli Edifici di Salvaguardia che alloggiano all'interno sistemi rilevanti per la sicurezza secondo un principio di ridondanza di uno-su-quattro (guasto su uno come evento iniziatore, un secondo mancante per il principio di "difetto singolo", un terzo non operativo per manutenzione, il quarto provvede alle necessità) sono dislocati in punto piuttosto separati in modo che un evento esterno nocivo secondo una determinata direzione di provenienza difficilmente può ripercuotersi su più di uno di questi edifici.

4.4 Gli altri importanti sistemi di Mille600

L'acqua del Circuito Principale è costantemente mantenuta al livello quantitativo necessario nelle condizioni normali di operazione ed entro i parametri chimici e contenuto radiologico dal Sistema di Controllo Volumetrico e Chimico del refrigerante (CVCS). Altri numerosi importanti sistemi contribuiscono al normale e sicuro funzionamento dell'impianto tuttavia per una breve rassegna ci limitiamo a citare i più significativi collocandoli in due categorie ispirate ai fronti successivi di "difesa in profondità": (a) quelli che servono a prevenire insorgenza di incidenti severi intervenendo sulle sequenze incidentali di progetto, e (b)quelli che in caso estremo servono a contenere i danni che derivano dall'incidente severo assunto come postulato. Tra quelli della prima categoria va annoverato il Sistema di Iniezione di Sicurezza (SIS) che interviene iniettando acqua borata in Reattore in caso di LOCA o in caso di rottura di un tubo del GV per contrastare la perdita di acqua nel reattore. Questo sistema è costituito di quattro treni ognuno asservito ai quattro treni del Circuito Principale. Ognuno di questi treni di SIS, provvisto all'interno del Contenitore Principale di un capace accumulatore di acqua borata, è dotato di pompe e linee di

iniezione a media e bassa pressione, di uno scambiatore per la rimozione del calore residuo sia in condizione normale di shut-down sia in shut-down a seguito di LOCA. Ogni treno di questo sistema è dotato inoltre di una linea di prelievo acqua dal IRWST. Per l'alloggiamento dei componenti del SIS, a parte gli accumulatori, ad ogni treno è dedicato un Edificio di Salvaguardia dove trovano sistemazione anche i componenti di altri sistemi di sicurezza organizzati in treni separati e ridondanti secondo il modulo di uno-su-quattro. Assieme al SIS per esempio sono presenti in quattro treni del Sistema di Acqua di Raffreddamento dei Componenti (CCWS) ed i sistemi elettrici di alimentazione e controllo. Il sistema di Raffreddamento Componenti distribuisce acqua di raffreddamento accessorio per la componentistica del Circuito Principale come ad esempio per le tenute sull'albero rotante delle pompe, rimuove calore dalla piscina di stoccaggio combustibile, e degli scambiatori stessi del SIS. Il CCWS interviene anche in condizioni estreme di incidente severo a rimuovere calore dall'acqua del IRWST messa in circolazione dal Sistema di Raffreddamento del Contenitore e pertanto in questa modalità operativa rientrerebbe piuttosto nella seconda categoria (b) di sistemi. Un diverso sistema provvede a conferire il calore raccolto dal al pozzo freddo finale ed è il Sistema di Acqua di Servizio Essenziale finale il ESWS. Anche questo organizzato in quattro distinti treni ed anche questo interviene in connessione con il CCWS in modalità speciali specifiche per condizioni di incidente severo. Sul versante del Circuito Secondario altri dispositivi e sistemi ad esso asserviti sono presenti per limitare le sequenze incidentali dopo LOCA, sono i Sistemi di Valvole di Isolamento della linee Principale di Vapore (MSIV) e i Sistemi di Valvole di Isolamento delle linee di Alimento Acqua al secondario del GV. Inoltre esiste un Sistema di Alimentazione in Emergenza di acqua al secondario del GV (EFWS), con scarico in atmosfera del vapore con il reattore portato allo shut-down dopo incidente con perdita della normale funzione di ripristino di acqua al secondario del GV. Questo sistema sempre organizzato in quattro distinti treni interviene fino a che non sono raggiunte le condizioni per cui interviene il SIS con le sue funzionalità di rimozione di Calore residuo con iniezione a bassa pressione.

Infine i sistemi di seconda categoria (b) che provvedono limitare i danni che deriverebbero dall'incidente severo, oltre ai ruoli parziali in questo ambito che hanno alcuni dei sistemi già descritti sopra, sono il Sistema di Raffreddamento del Contenitore (CHRS) e Il Sistema di Raccolta e Stabilizzazione del Corium correntemente definito come “Core Catcher". Il primo consiste in due treni speciali dedicati a prelevare acqua dal IRWST e pomparla attraverso uno scambiatore esterno al Contenitore Principale per assicurare il raffreddamento e reiniettarla attraverso spruzzatori distribuiti nel cielo internamente al Contenitore. Con questo sistema, poiché l'acqua prelevata dal IRWST ed iniettata attraverso gli spruzzatori viene raccolta e drenata per caduta sempre entro il IRWST, si intende assicurare nei tempi lunghi che possono seguire ad una situazione di incidente severo un livello di pressurizzazione del Contenitore accettabile. I tempi utili di intervento di questo sistema sono 12 ore dopo l'incidente quindi questo termine risulta come "tempo di grazia" concesso all'operatore di impianto per decidere e mettere in atto il dispositivo. Il "Core Catcher" è invece un sistema che con dispositivi passivi basti sul principio di termofusione apre una via preferenziale di colata dl combustibile fuso fuori dal vessel verso un "catino di raccolta" dove il fuso si spande e incontra uno strato di materiale sacrificale generando una amalgama chiamata genericamente Corium in cui per diluizione la densità di potenza di decadimento del

combustibile si attenuata e si evita il rischio di riaggregazione in configurazioni critiche. Sempre per meccanismo passivo basato sul principio di fusione termica viene aperta una via di irrorazione di acqua dall'IRWST all'esterno sul fondo del catino che produce un suo raffreddamento con formazione di una crosta del "Corium" a diretto contatto all'interno realizzando in tale modo la condizione di una sorta di "Crogiolo Freddo" in cui il Corium viene configurato in modo stabile avendo modo di smaltire nel tempo il suo calore di decadimento. L'acqua raffreddando il catino vaporizza e liberamente per convezione naturale sale a raffreddarsi e ricondensare alla pareti più fredde del Contenitore e ricade raccogliendosi nella piscina del IRWST. In collaborazione con questo meccanismo naturale passivo può eventualmente anche partecipare il sistema attivo a spruzzo del CHRS.

5 Riferimenti di accesso al documento

Il 27 aprile 2010 RSE ha messo a disposizione del GdL uno spazio su un server di sua proprietà con il quale potere raccogliere i contributi dei partecipanti al progetto. Ogni partecipante può accedere al server RSE con connessione secondo protocollo FTP. Le organizzazioni potranno accedervi in funzione del ranking gerarchico assegnato e potranno trovare i documenti di lavoro prodotti da parte dei partecipanti al GdL Mille600.

Il 30 settembre 2010 RSE ha fatto una nuova descrizione del sito ftp disponibile a tutti i membri del GdL Mille600 evidenziando anche che esso ora gode di alcune funzionalità aggiuntive. Ha descritto alcuni esempi di accesso al sito e ricordato che i responsabili delle varie organizzazioni sono anche responsabili delle modalità d'accesso al sito e di come i dati e le informazioni lì presenti vengono utilizzati. Altra documentazione verrà inserita e altri riferimenti si renderanno disponibili a breve, compresi i verbali delle varie riunioni. Al momento l'accesso è a diritto paritario. Si è discussa la possibilità di creare modalità d'accesso con diritti variabili e differenziati a seconda delle relative responsabilità al fine di evitare possibile diffusione di documentazione in ambienti non autorizzati a riceverla. Si è precisato che tutta la documentazione di lavoro è accessibile esclusivamente ai membri del GdL e che solo il prodotto finale, identificato come database di riferimento, sarà ad accesso libero.

Il 27 giugno 2011 (quindi dopo il referendum) si è deciso di re-impostare *password* e *username* per l'accesso al sito ftp, in modo da limitare gli accessi ai soli responsabili della redazione dei vari capitoli.

6.1 *Caratteristiche Generali*

Il modello di reattore considerato nel presente studio e denominato Mille600, è quello di un tipico impianto pressurizzato di III generazione a 4 – *loops*, da 4600 MW termici (1600 MWe), raffreddato e moderato con acqua alla pressione di 15.5 MPa. Il fluido termovettore entra nel nocciolo alla temperatura di 295 °C, lambisce gli elementi di combustibile, ed esce alla temperatura di 330 °C. Il combustibile è quello tipico di un impianto pressurizzato e può raggiungere elevati tassi di bruciamento (fino 60 GWd/t), impiegando come combustibile UO_2 ma anche MOX fino al 50%. Il nocciolo è costituito da 241 elementi di combustibile a diverso arricchimento. Il controllo della reattività in eccesso del combustibile ad inizio vita è affidato a veleni bruciabili, mentre boro disciolto nel moderatore (acido borico) e barre di controllo assicurano la criticità del nocciolo durante tutto il ciclo di funzionamento. In particolare, la concentrazione di boro durante l'esercizio viene modificata in modo da compensare la riduzione di reattività nel combustibile a seguito del bruciamento, avvelenamento (prodotti di fissione, inclusi Xeno e Samario) e cambiamenti nella temperatura del nocciolo (passando da condizioni a freddo a condizioni operative).

I principali dati del nocciolo Mille600 sono presentati nella Tabella 1.

Tabella 1: Dati generali del nocciolo

Descrizione		Valore	Unità	Riferimento
Potenza elettrica		1600	MW	
Potenza termica		4590	MW	Da specifica del GdL (Nota (2))
Portata massica di refrigerante nel nocciolo		22225	kg/s	
Portata al bypass (in %)		5.19	%	[Sengler, 1999]
Pressione operativa		15.5	MPa	[Sengler, 1999]
Tasso di bruciamento		≥ 60	GWD/MTU	[Sengler, 1999]
Numero di elementi di combustibile		241		[Sengler, 1999]
Reticolo		17x17		[Sengler, 1999]
Interasse degli elementi		21.504	cm	[UK-EPR, 2007]
Lunghezza attiva dell'elemento di combustibile		4200	mm	[Sengler, 1999]
Peso del combustibile per elemento		536.1	kg U	Calcolato
Temperatura di ingresso al nocciolo del refrigerante	HZP	303	°C	Nota (3)
	HHP	301		
	HFP	295		
	CZP	20		
Temperatura media nel vessel		312.1	°C	
Temperatura media nel nocciolo		313.6	°C	
Diametro equivalente della zona attiva del nocciolo		376.7	cm	[UK-EPR, 2007]
Rapporto altezza /diametro del nocciolo		1.115		[UK-EPR, 2007]
Area attiva del nocciolo		11.14437	m^2	Calcolato
Densità di potenza		98.277	kW/l	Nota (4)

---

[2] *GdL = Gruppo di Lavoro Mille600*

[3] *HZP = Hot Zero Power, HHP = Hot Half Power, HFP = Hot Full Power, CZP = Cold Zero Power*

[4] *La densità di potenza è calcolata come: potenza termica / (numero elementi combustibile * volume elemento combustibile)*

6.2 Dati barra di combustibile

Ogni barretta di combustibile è composta da pastiglie di UO_2 contenute in tubi di acciaio e il cui arricchimento può raggiungere il valore massimo di 4.95 wt% in U-235. Le barrette di combustibile possono avere differenti composizioni lungo tutta la lunghezza dell'elemento di combustibile e possono contenere sia UO_2 che UO_2 miscelato ad ossido di gadolinio (Gd_2O_3) quale veleno bruciabile. In particolare, assialmente la barretta è costituita di una zona centrale contenente UO_2 altamente arricchito, due zone esterne superiori e inferiori, denominate di *cutback* ad arricchimento intermedio, ed infine due zone esterne dette di *blanket* con UO_2 a più basso arricchimento [U.S.-EPR, 2008]. La suddivisione assiale in zone omogenee della barretta di combustibile è illustrata nella Figura 1:

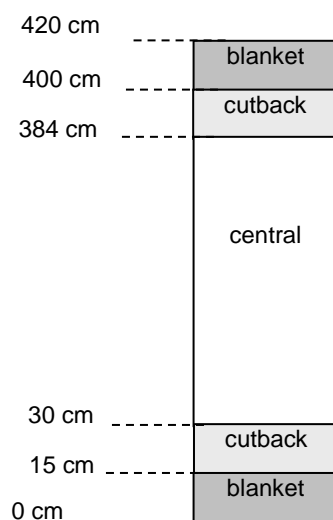



Figura 1: Suddivisione in zone assiali omogenee della barretta di combustibile

Tab. 2 -Tabella 2 Dati relativi alle barretta di combustibile

Descrizione	Valore	Unità	Riferimento
Interasse delle barretta di combustibile	12.6	mm	[Sengler, 1999]
Lunghezza della barretta di combustibile	420	cm	[Sengler, 1999]
Lunghezza totale della barretta	455	cm	
Raggio esterno della pastiglie di combustibile	4.0957	mm	Dati tipici
Raggio interno della barretta	4.1795	mm	Dati tipici
Raggio esterno della barretta	4.75	mm	Dati tipici
Materiale della barretta	Zircaloy		[Sengler, 1999]
Gas di riempimento della barretta	He		
Pressione del gas di riempimento della barretta	1.518	MPa	
Altezza della pastiglie di combustibile	1.348 (UO_2) 1.348 (UO_2 con Gd_2O_3)	cm	
Densità teorica UO_2	10.96	g/cm3	[U.S.-EPR, 2008]
% della densità teorica	95 - 98	%	[U.S.-EPR, 2008]

Descrizione	Valore	Unità	Riferimento
Densità UO_2	10.52	g/cm3	Nota (5)
Densità Gd_2O_3	7.41	g/cm3	
Potenza lineare	17.14	kW/m	
Arricchimento in U-235	2 ÷ 4.95	wt%	
Densità del combustibile UO_2 + Gd_2O_3	10.24 – 10.45	g/cm3	Nota (6)
% in peso di Gd_2O_3	2 - 8	wt%	
N° totale di barrette con veleni bruciabili	2284		
N° totale di barrette di combustibile	63624		Nota (7)

[5] *ρ (UO2) = densità teorica UO2 * % densità teorica = 10.96 * 0.96 = 10.52 g/cm^3*

[6] *ρ (UO2 + Gd2O3) = ρ(UO2) - 0.03 * %w (Gd_2O_3) g/cm^3*

[7] *tale valore è calcolato considerando il reticolo17x17 di barrette, nella quale 24 posizioni sono utilizzati per le barre di controllo e 1 posizione per il tubo della strumentazione*

6.3 Dati elemento di combustibile

L'elemento di combustibile è costituito da barrette alloggiate secondo un reticolo 17x17, di cui 264 sono di combustibile, 24 sono tubi guida ed 1 è un tubo strumentato. Due griglie spaziatrici terminali e otto griglie spaziatrici intermedie mantengono l'allineamento del reticolo. Nella Tabella 3 sono riportati i dati generali dell'elemento di combustibile.

Nella Figura 2 è riportata la struttura del generico elemento di combustibile con le posizioni delle barrette, dei tubi guida e del tubo per la strumentazione.

In generale, si possono identificare differenti tipi di elementi di combustibile i quali differiscono in base a:

- arricchimento in U-235 (2.25, 2.70, 3.25 wt %)
- arricchimento di U-235 e percentuale di Gd_2O_3 (2, 4, 6, 8 wt %)
- numero e posizionamento delle barrette con veleni bruciabili nel reticolo.

Tabella 3: Dati relativi all'elemento di combustibile

Descrizione	Valore	Unità	Ref
Tipo elemento	17x17		[Sengler, 1999]
Numero di barrette di combustibile per elemento	264		
Numero di tubi guida per elemento	24		Nota (8)
Numero di tubi strumentati	1		
Larghezza dell'elemento di combustibile	21.4	cm	Calcolato

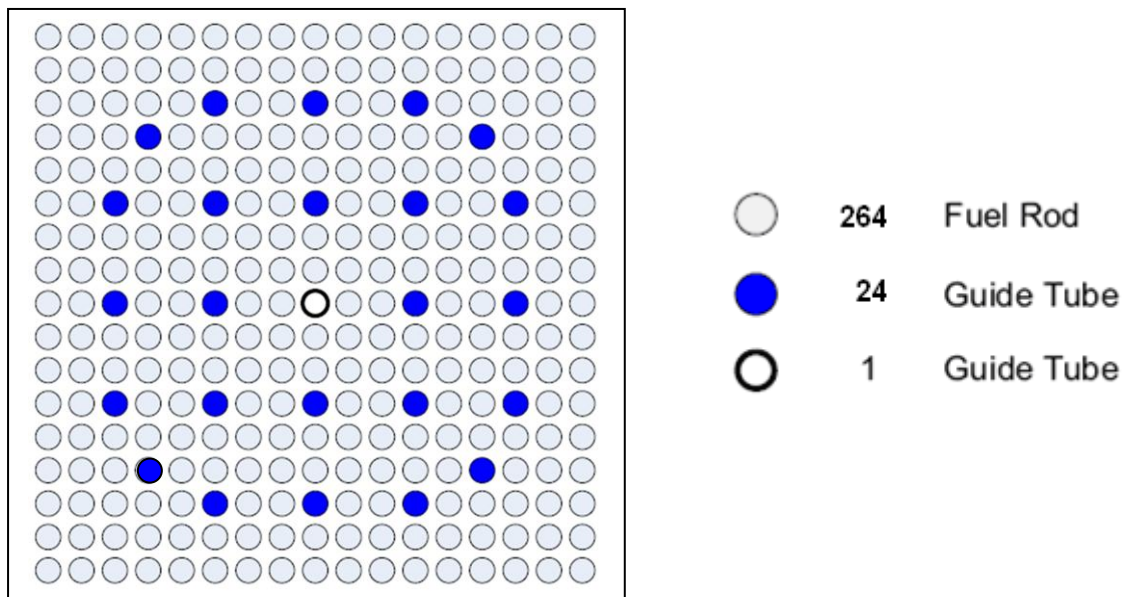



Figura 2 Struttura dell'elemento di combustibile: in evidenza la posizione delle barrette di combustibile, dei tubi guida e del tubo strumentato.

---

[8] *A seconda dell'elemento di combustibile, i 24 tubi guida possono alloggiare il sistema di controllo.*

In Tabella 4 sono riepilogati per ogni tipo di elemento il numero di barre e la percentuale di uranio arricchito e/o la percentuale di Gadolinio.

Tabella 4: Caratteristiche dei tre tipi di elementi di combustibile

Tipo Elemento	Num elementi	Elementi con UO_2 wt%	Elementi con Gd_2O_3 wt%	numero barrette di Gd_2O_3
A	76	2.0 - 2.25	0 - 4	0 - 4
B	88	2.0 - 2.70	2 - 8	12 - 16
C	77	2 - 3.25	2 - 8	8 - 16

6.4 Composizione vettore Plutonio per MOX

La Tabella 5 fornisce i dati del vettore plutonio per la definizione di elementi di combustibile tipo MOX, da [UK-EPR, 2007].

Tabella 5: vettore plutonio per la definizione di elementi di combustibile tipo MOX

isotopo	**w%**
Pu238	4.0
Pu239	50.0
Pu240	23.0
Pu241	12.0
Pu242	9.5
Am241	1.5

6.5 Barre di controllo

Il reattore è dotato di 89 barre di controllo (RCCA), di cui 41 vengono utilizzate per il controllo della potenza (banchi di controllo) e 48 invece sono utilizzate per lo spegnimento (banchi di shut-down). I banchi sono posizionati all'interno del nocciolo secondo la mappa riportata in Figura 3 e sono identificati con le sigle A, B, C, D, SA, SB e SC. La potenza è regolata da 0% al 100% attraverso la sovrapposizione dei banchi di controllo A,B,C,D. Nella tabella 4 sono riportati i dati relativi alle barre di controllo.

Nella Tabella 6 seguente sono riportati i dati relativi alle barre di controllo.

Tabella 6: Dati relativi alle barre di controllo

Descrizione	Valore	Unità	Riferimenti
Materiali assorbitori	Ag - In- Cd		[Sengler, 1999]
Percentuale in peso dei diversi materiali assorbitori (Ag, In, Cd)	80, 15, 5	%	
Numero di barrette assorbenti per ogni elemento di combustibile	24		[Sengler, 1999]
Numero di elementi con barre di controllo	89		[Sengler, 1999]
lunghezza parte assorbente	424	cm	
Lunghezza totale barra di controllo (RCCA)	471.74	cm	
Passo minimo di movimentazione barra	1.00	cm	
numero di passi totali	424		Nota (9)
Raggio interno assorbitore	0.221	cm	[U.S.-EPR, 2008]
Raggio esterno assorbitore	0.433	cm	
Densità assorbitore	10.17	g/cm3	[Sengler, 1999]
Raggio interno guaina	0.4368	cm	
Raggio esterno guaina	0.4838	cm	
Materiale guaina	Zircaloy		[Sengler, 1999]
Altezza controllata	412	cm	Nota (10)

[9] *numero di passi = lunghezza parte assorbente barra / misura dello step = 424 / 1.00 = 424*

[10] *calcolata sfruttando la proporzione con un nocciolo di PWR "classico" (da dati Casmo-Simulate)*

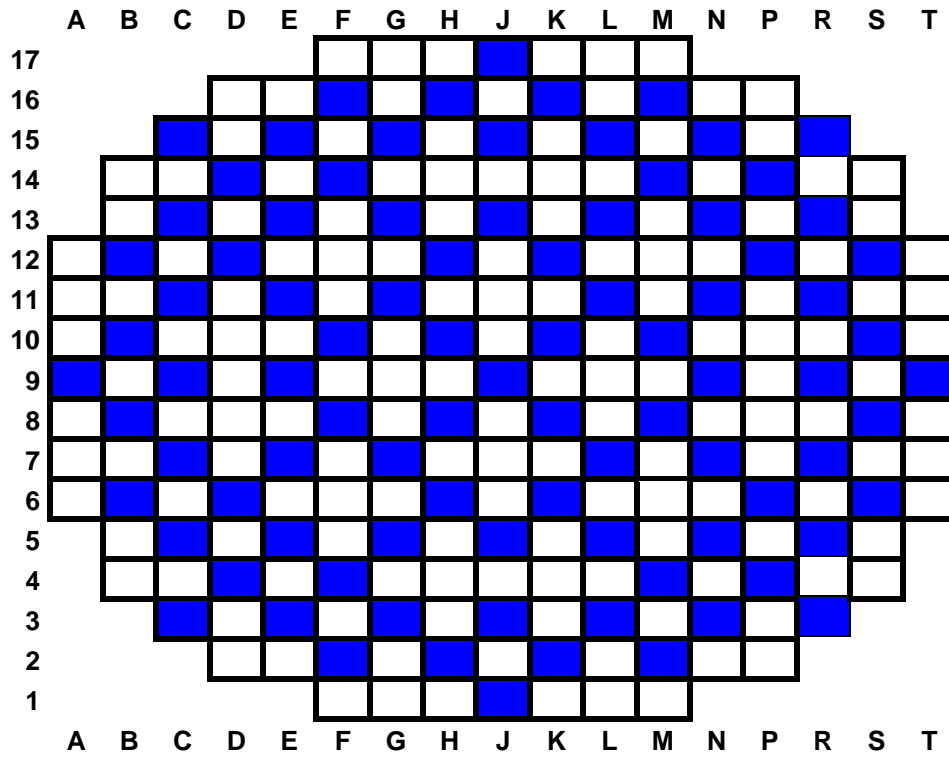



Figura 3 Posizione degli elementi controllati nel nocciolo e denominazione dei diversi banchi

6.6 *Dati dei riflettori*

La finalità del riflettore è di ridurre le fughe, migliorando l'economia neutronica nel nocciolo, il nocciolo ha tre zone di riflettore:

- Il *riflettore radiale* è costituito da una struttura in acciaio dello spessore di 3 cm (baffle) e da acqua, per uno spessore complessivo di circa 20 cm.

- Il riflettore superiore suddiviso nelle seguenti 3 regioni:

Regione	composizione	% volume	altezza totale
3	H2O	52.72	4.353 cm
	SS	9.17	
	Zr	9.41	
	He	26.77	
	Inconel	1.92	
2	H2O	56.69	5.87 cm
	SS	9.74	
	Zr	9.41	
	He	24.16	
1	H2O	59.57	20.157 cm
	SS	6.98	
	Zr	9.41	
	He	24.16	
NOCCIOLO			

- Il riflettore inferiore suddiviso in 3 regioni:

Regione	composizione	% volume	altezza totale
1	H2O	74.51	20.157 cm
	SS	0.74	
	Zr	24.42	
2	H2O	70.92	5.87 cm
	SS	29.08	
3	H2O	37.96	4.353 cm
	SS	62.04	

6.7 *Griglie spaziatrici*

Nella Tabella 7 si riportano i principali dati relativi alle griglie spaziatrici

Tabella 7: Dati relativi alle griglie spaziatrici

Descrizione	Valore	Unità	Riferimenti
Numero di griglie per elemento di combustibile (2 griglie spaziatrici poste agli estremi di ciascun elemento)	10		[U.S.-EPR, 2008]
Materiale delle griglie spaziatrici intermedie	M5		[U.S.-EPR, 2008]
Materiale delle griglie poste alle estremità dell'elemento di combustibile	Alloy 718		[U.S.-EPR, 2008]
Altezza spaziatori	4.45	cm	[U.S.-EPR, 2008]
Densità lineare	16.45	gr/cm	Valutazione RSE (riferimento ad altri noccioli)
Densità media materiale	8.14	g/cm^3	Valutazione RSE (riferimento ad altri noccioli)
Distanza dello spaziatore dal fondo della zona attiva	3.154	cm	Valutazione RSE (riferimento ad altri noccioli)
Distanza tra gli spaziatori intermedi	58.48	cm	

6.8 *Mappa primo caricamento*

Descrizione della mappa, un quarto di nocciolo, di caricamento iniziale.

	J	K	L	M	N	P	R	S	T
9	C	B	A	B	C	B	C	C	A
8	B	B	B	A	B	A	B	C	A
7	A	B	A	B	C	B	B	C	A
6	B	A	B	A	B	B	C	C	A
5	C	B	C	B	C	B	C	A	
4	B	A	B	B	B	C	C	A	
3	C	B	B	C	C	C	A		
2	C	C	C	C	A	A			
1	A	A	A	A					

6.9 Riferimenti Bibliografici

[CASMO, 2007] " CASMO5/CASMO-5M: A Fuel Assembly Burnup Program", J. Rhodes, K. Smith, D. Lee, Studvik SSP-07/431 Rev 0 (2007)

[SIMULATE, 2007] "SIMULATE-3: Advanced Three-Dimensional Two-Group Reactor Analysis Code", Studvik Scandpower, SSP-01/414 Rev. 3 (2007)

[Sengler, 1999] *EPR Core Design* , G. Sengler, F. Foret, G. Schlosser, R. Lisdat, S. Stelletta Nuclear Engineering and Design 187 (1999) 79-119;

[UK-EPR, 2007] *Fundamental Safety Overview*, HSE - UK-EPR, 2007;

[U.S.-EPR, 2008] U.S. EPR final safety analysis report, NRC, 8/2008;

7 Vessel e circuito primario

Responsabile del Capitolo	ENEA
Organizzazioni contribuenti	RSE
	UniPa-DIN - Palermo
	UniRoma

7.1 Descrizione del Sistema di Raffreddamento del Reattore e dei Sistemi Connessi

Il sistema di raffreddamento del reattore è formato da 4 loop progettati per trasferire il calore dal nocciolo del reattore collocato all’interno del vessel pressurizzato (RPV : reactor pressure vessel) al sistema secondario del generatore di vapore dell’impianto. Ogni loop contieni un generatore di vapore ed una pompa. Il sistema, inoltre include un pressurizzatore connesso ad una singola gamba calda di un loop.

Gli elementi costitutivi del sistema di raffreddamento sono quindi i seguenti (fig.3.1 e fig.3.2):

- 1 reactor vessel (reactor pressure vessel: RPV)
- 4 generatori di vapore (steam generators : SG)
- 4 pompe di raffreddamento (reactor coolant pumps : RCP)
- 1 pressurizzatore (PSZ)
- 1 serbatoio di sfogo del pressurizzatore (pressurizer relief tank: SRP)
- tubature di raccordo tra i componenti
- valvole di sfogo di sovrapressione (pressurizer safety relief valve: (PSRV)

Il sistema di raffreddamento è alloggiato nell’edificio di contenimento del reattore. L’acqua del sistema di raffreddamento è usata come moderatore del reattore, come riflettore per i neutroni e come solvente per il boro usato come assorbitore chimico (chemical shim). L’acqua utilizzata è demineralizzata e borata.

Durante il normale funzionamento del reattore, la mistura di acqua- vapore saturata è mantenuta all’equilibrio alle pressione desiderate all’interno del pressurizzatore tramite dei riscaldatori, per la vaporizzazione, e degli spray, per la condensazione. Vi sono inoltre delle valvole di sfogo di sovrapressione (PSRV) che consente di scaricare il vapore all’occorrenza ed inoltre un serbatoio di sfogo dove il vapore viene condensato e raffreddato in acqua.

In Figura 4 è rappresentato lo schema in pianta dell’impianto di raffreddamento mentre in Figura 5 è riportato uno schema delle altezze relative dei componenti principali del sistema di raffreddamento del reattore. In Tabella 8 sono riportati i dati caratteristici del sistema.

Figura 4: Schema dell'impianto di raffreddamento del reattore

Figura 5: Schema delle posizioni dei componenti principali del sistema di raffreddamento del reattore

Tabella 8: dati caratteristici del sistema

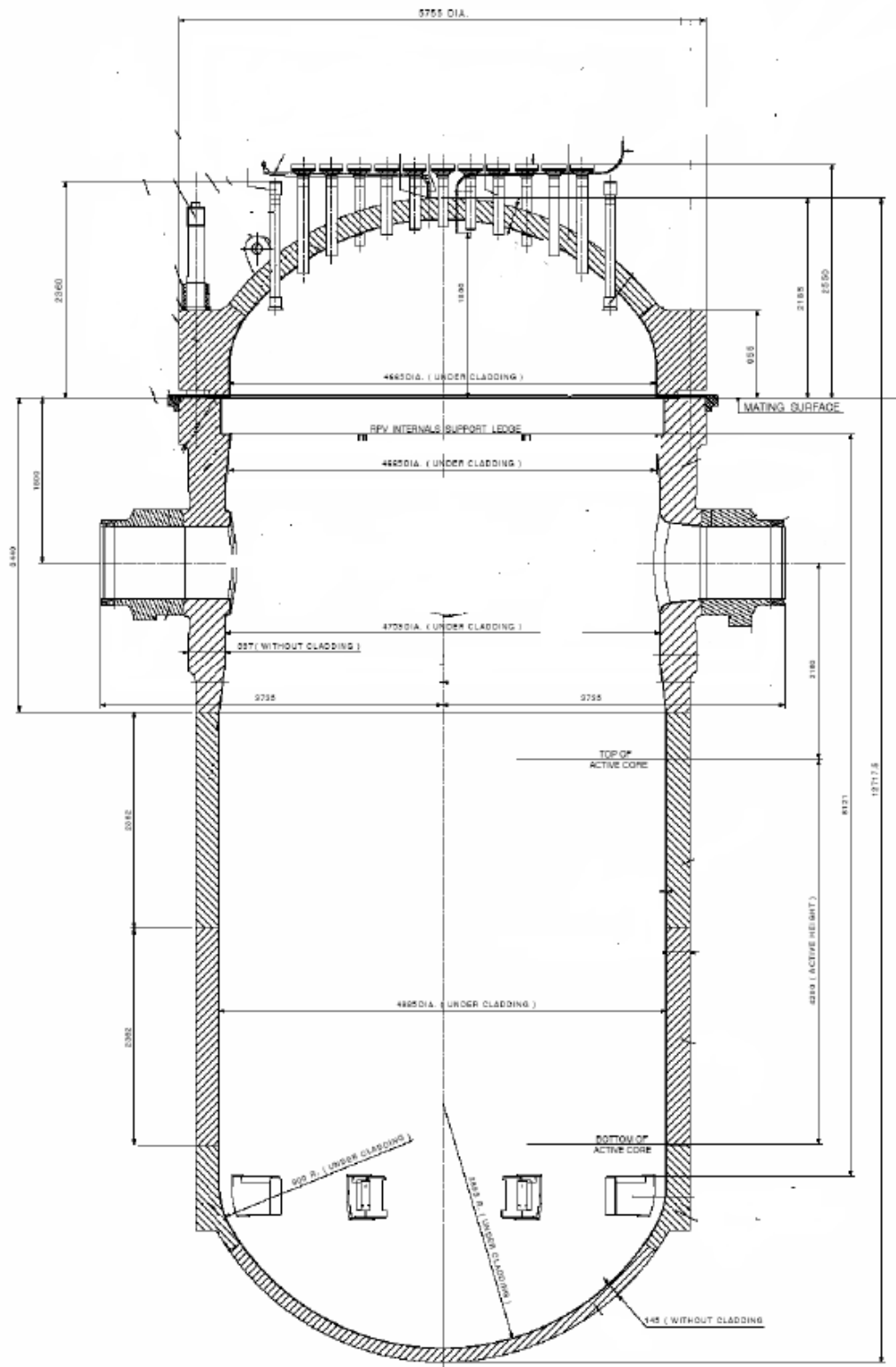
Descrizione	Valore	Unità	Riferimento
Potenza elettrica	1600	MW	[U.S.-EPR, 2008]p. 4.3-39
Potenza termica	4590	MW	[U.S.-EPR, 2008]p. 4.3-39
Core total rated flow	22225	kg/s	[U.S.-EPR, 2008]p. 4.3-39
Core nominal bypass flow percentage	5.5	%	[U.S.-EPR, 2008]p. 4.3-39
Pressione operativa	15.5	MPa	[U.S.-EPR, 2008] p. 1.3-2
Numero di loop	4		[U.S.-EPR, 2008]p. 4.1-17
Temperatura Cold Leg / Cross-over Leg	295.	°C	[U.S.-EPR, 2008] p. 5.1-6
Temperatura Hot Leg	329.	°C	[U.S.-EPR, 2008] p. 5.1-6
Temperatura media	312.	°C	[U.S.-EPR, 2008] p. 5.1-6
Flusso volumetrico per loop	7.869	m3/s	[U.S.-EPR, 2008] p. 5.1-6
Flusso di massa per loop	5797.126	kg/s	[U.S.-EPR, 2008] p. 5.1-6
Volume nominale RCS (senza PZR)	385	m3	[U.S.-EPR, 2008] p. 5.1-6
Volume nominale PZR	75	m3	[U.S.-EPR, 2008] p. 5.1-6
Temperature at Hot Standby	303	°C	[U.S.-EPR, 2008] p. 5.1-6
Area del flusso del raffreddamento del nocciolo	5.9	m2	[U.S.-EPR, 2008] p. 4.4-26
Velocità media del raffreddamento del nocciolo	5.4	m/s	[U.S.-EPR, 2008] p. 4.4-26
Velocità media in massa del raffreddamento del nocciolo	3.8	kg/s m2	[U.S.-EPR, 2008] p. 4.4-26

7.2 Vessel del reattore

Il vessel del reattore è composto da due componenti in acciaio: un corpo cilindrico ed una testa di chiusura. Il corpo del vessel presenta nella parte superiore 8 penetrazioni connesse ai 4 loop del sistema di raffreddamento del nocciolo: 4 bocchelli di entrata (delle cold leg) e 4 bocchelli di uscita (delle hot leg) del liquido di raffreddamento, posizionati sotto la flangia di chiusura del contenitore ma al di sopra delle barre di combustibile. Il liquido di raffreddamento viene iniettato dai bocchelli di entrata e scorre verso il basso nella shell esterna compresa tra il combutibile e la parete del contenitore e successivamente fluisce attraverso il combustibile acquisendo energia termica defluendo poi dai bocchelli di uscita.

La testa di chiusura del vessel contiene delle perforazioni per il meccanismo di inserimento delle barre di controllo e per la strumentazione di monitoraggio. Non ci sono penetrazioni sul fondo del vessel.

In

Figura 6 è riportato lo schema del vessel del reattore con le principali misure.

Descrizione	Valore	Unità	Riferimento
Pressione di progetto	17.6	MPa	[U.S.-EPR, 2008]p. 5.3-21
Pressione nominale	15.5	MPa	[UK-EPR,2009]cap5.3 p26
Temperatura di progetto	351	°C	[UK-EPR,2009]cap5.3 p26
Temperatura hot leg	328.1	°C	[UK-EPR,2009]cap5.3 p26

Tempertaru cold leg	295.5	°C	[UK-EPR,2009]cap5.3 p26
Peso corpo del vessel	410000	kg	[UK-EPR,2009]cap5.3 p26
Peso testa del vessel	116000	kg	[UK-EPR,2009]cap5.3 p26
Peso bulloni, rondelle etc	32000	kg	[UK-EPR,2009]cap5.3 p26
Geometria			
Altezza totale del vessel	12720	mm	[UK-EPR,2009]cap5.3 p28
Diametro esterno Vessel	5750	mm	[UK-EPR,2009]cap5.3 p26
Diametro interno Vessel	4870	mm	[UK-EPR,2009]cap5.3 p26
Spessore del vessel	250	mm	[U.S.-EPR, 2008]p. 5.3-21
Spessore nominale del cladding	7.5	mm	[U.S.-EPR, 2008]p. 5.3-21
Altezza nocciolo	4200	mm	[UK-EPR,2009]cap5.3 p28
Distanza centro hot leg dal fondo vessel	8717	mm	[UK-EPR,2009]cap5.3 p28
Distanza del centro bocchello della gamba alla cima del nocciolo attivo	2160	mm	[UK-EPR,2009]cap5.3 p28
Distanza del centro bocchello della gamba alla flangia upper head	1800	mm	[UK-EPR,2009]cap5.3 p28
Volume lordo interno	216	m3	
Flussi di calore			
Velocità media fluido raffreddamento nel nocciolo	5.4	m/s	[U.S.-EPR, 2008]p. 4.4-26
Velocità media della massa nel nocciolo	380	kg/s*m2	[U.S.-EPR, 2008]p. 4.4-26
Flusso termico in massa nel vessel	23.23	kg/s	[U.S.-EPR, 2008]p. 4.4-26
Flusso termico di progetto nel vessel	30.2	m3/s	[U.S.-EPR, 2008]p. 4.4-26
Flusso termico nel vessel	31.5	m3/s	[U.S.-EPR, 2008]p. 4.4-26
Flusso medio di calore nel nocciolo	558340.7	W/m2	[U.S.-EPR, 2008]p. 4.4-26
Flusso massimo di calore nel nocciolo	1451687.07	W/m2	[U.S.-EPR, 2008]p. 4.4-26

Temperature			
Temperatura di ingresso	295.3	°C	[U.S.-EPR, 2008]p. 4.4-26
Aumento medio temperatura nel Vessel	15.9	°C	[U.S.-EPR, 2008]p. 4.4-26
Aumento medio temperatura nel nocciolo	17.05	°C	[U.S.-EPR, 2008]p. 4.4-26
Temperatura media nel nocciolo	313.8	°C	[U.S.-EPR, 2008]p. 4.4-26
Temperatura media nel Vessel	312.2	°C	[U.S.-EPR, 2008]p. 4.4-26
Temperatura hot leg	328.1	°C	[UK-EPR,2009]cap5.3 p26
Tempertaru cold leg	295.5	°C	[UK-EPR,2009]cap5.3 p26

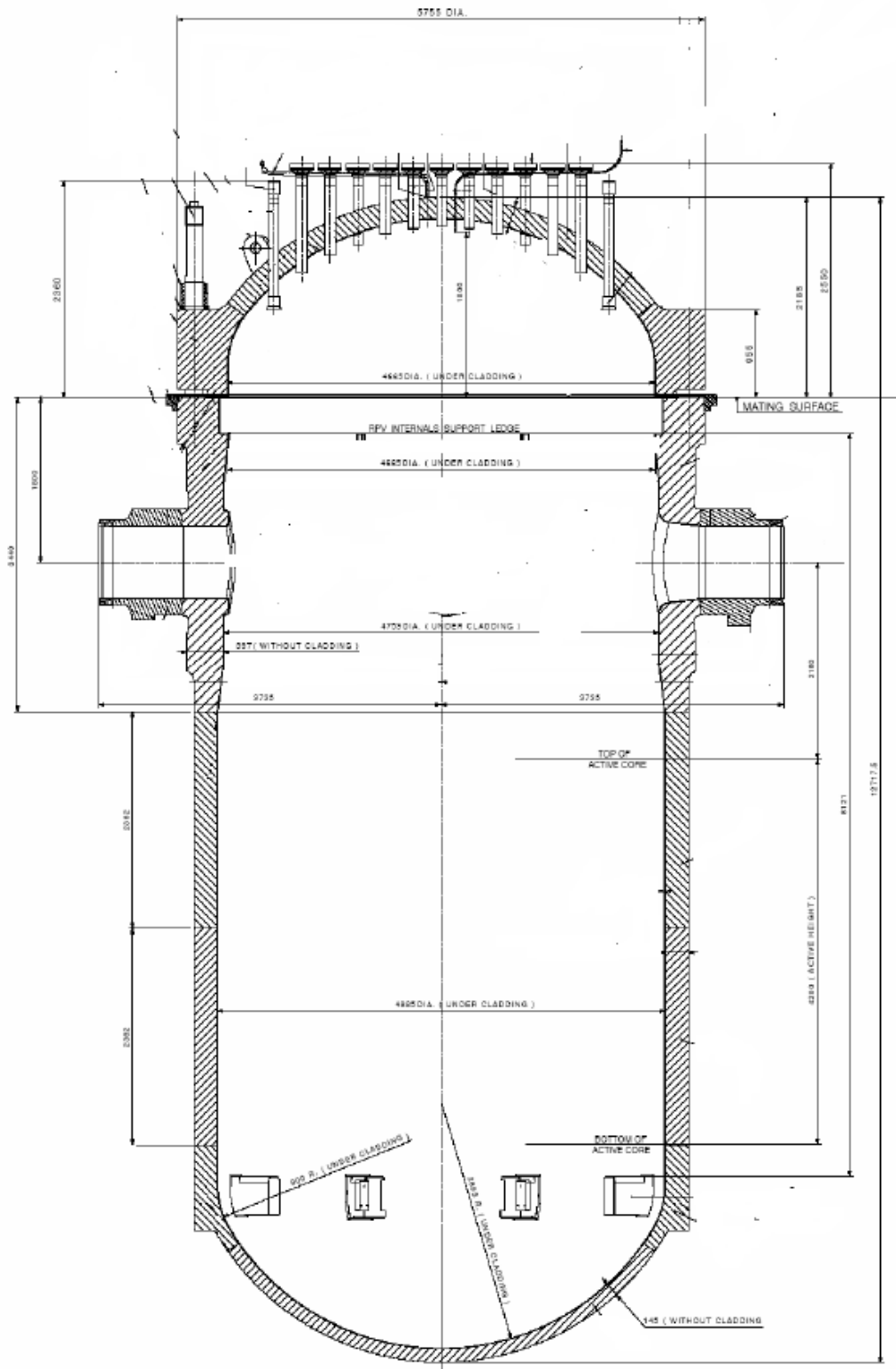



Figura 6: Schema del Vessel del reattore

7.3 Meccanismo di movimentazione delle barre di controllo

Descrizione	Valore	Unità	Riferimento
Step	10	mm	[U.S.-EPR, 2008]p. 5.3-21
Velocità di inserimento delle barre di controllo	750	mm/min	[U.S.-EPR, 2008]p. 5.3-21
Durata dello Scram	3.5	sec	[U.S.-EPR, 2008]p. 5.3-21
Numero di passi totali	424	N°	[U.S.-EPR, 2008]p. 5.3-21
Numero banchi barre di controllo	89	N°	[U.S.-EPR, 2008]p. 5.3-21
Numero di barre assorbenti per ogni elemento	24	N°	[U.S.-EPR, 2008]p. 5.3-21

7.4 Pompe del sistema di raffreddamento del reattore

Reactor coolant pumps—The RCPs are vertical, single stage, centrifugal units driven by air-cooled, three-phase induction motors. The RCP motor is mounted above the pump on the top of the vertical shaft. A flywheel on the shaft above the motor provides inertia to extend pump coast-down. Water suction is axial and discharge is radial. The RCP shaft seal system consists of a multi-stage seal and a standstill seal.

In tabella sono riportate alcune caratteristiche delle pompe.

Tabella 9: alcune caratteristiche delle pompe

Descrizione	Valore	Unità	Riferimento
Pressione di progetto	17.5	MPa	[UK-EPR,2009]cap5.4 p12
Temperatura di progetto	351.	°C	[UK-EPR,2009]cap5.4 p12
Portata media	28320	m3/h	[UK-EPR,2009]cap5.4 p12
T di entrata	296	°C	[UK-EPR,2009]cap5.4 p12
Velocità di rotazione	1485	rpm	[UK-EPR,2009]cap5.4 p12
Prevalenza	98	MPa	[UK-EPR,2009]cap5.4 p12
Inerzia della pompa	5210	kg *m2	[UK-EPR,2009]cap5.4 p12
Peso pompa (con supp. motore)	55200	kg	[UK-EPR,2009]cap5.4 p12
Peso del motore (senza acqua o olio)	60900	kg	[UK-EPR,2009]cap5.4 p12
Potenza al riduttore	860	kW	[UK-EPR,2009]cap5.4 p12
Altezza	9.3	m	[UK-EPR,2009]cap5.4 p12
N di pompe	4		[UK-EPR,2009]cap5.4 p12

7.5 Tubazioni del sistema di raffreddamento del reattore

Il circuito di raffreddamento del reattore si articola in tubature di gamba calda, gamba fredda e condotti intermedi. Le tubazioni di gamba calda si estendono dall'uscita del vessel del reattore al generatore di vapore, quelle intermedie collegano il generatore di vapore con la pompa ri ricircolo mentre le tubazioni di gamba fredda collegano la pompa al vessel del reattore chiudendo il circolo di raffreddamento. I condotti della linea del pressurizzatore sono costituiti da una linea che collega il pressurizzatore ad una gamba calda. Vi sono poi due linee che collegano gli spruzzatori interni al pressurizzatore con due gambe fredde (vedi Figura 7). Di seguito sono riportati i dati principali di tali linee di tubazioni. Tutte le tubazioni sono in acciaio inossidabile austenitico.

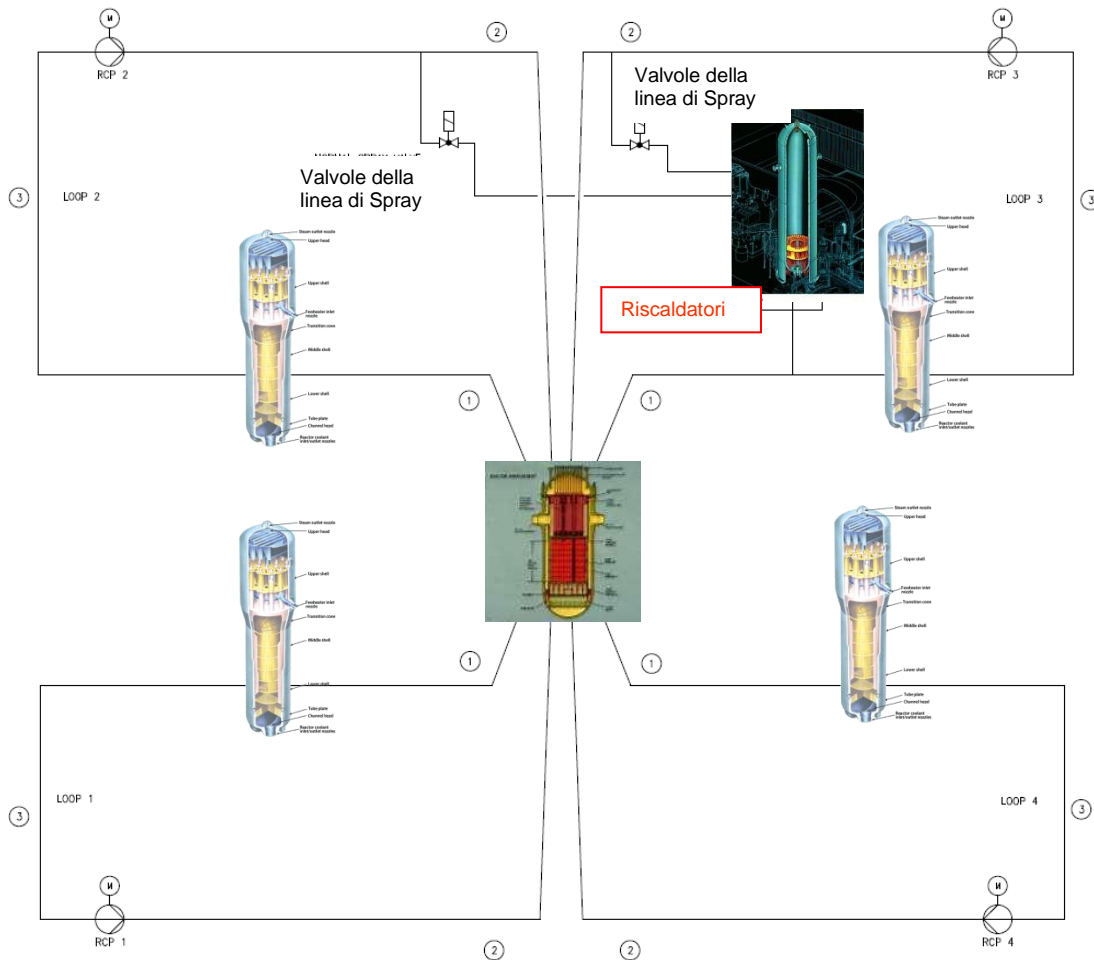



Figura 7: Tubazioni del sistema di raffreddamento del reattore

Descrizione	Valore	Unità	Riferimento
Linee di raffreddamento del reattore (Reactor Coolant System –RCS) (1 di 4)			
Pressione di design	17.48	MPa	
Temperatura di design	351.	°C	
Sviluppo lungh tratto Hot Leg	6700	mm	[UK-EPR,2009]cap5.4 p54
Sviluppo lungh tratto Cross Over	8700	mm	[UK-EPR,2009]cap5.4 p54
Sviluppo lungh tratto Cold Leg	7700	mm	[UK-EPR,2009]cap5.4 p54
Volume interno del fluido tratto Hot Leg	3.2	m3	[UK-EPR,2009]cap5.4 p54
Volume int tratto Cross Over	3.7	m3	[UK-EPR,2009]cap5.4 p54
Volume int tratto Cold Leg	4.2	m3	[UK-EPR,2009]cap5.4 p54
Peso strutt. tratto Hot Leg	11800	kg	[UK-EPR,2009]cap5.4 p54
Peso strutt. tratto Cross Over	14500	kg	[UK-EPR,2009]cap5.4 p54
Peso strutt. tratto Cold Leg	13100	kg	[UK-EPR,2009]cap5.4 p54
Volume massa metallica tratto Hot Leg	1.5	m3	[UK-EPR,2009]cap5.4 p54
Volume massa metallica tratto Cross Over	1.85	m3	[UK-EPR,2009]cap5.4 p54
Volume massa metallica tratto Cold Leg	1.65	m3	[UK-EPR,2009]cap5.4 p54
Superficie interna Hot Leg	16.3	m2	[UK-EPR,2009]cap5.4 p54
Superficie interna Cross Over	21.3	m2	[UK-EPR,2009]cap5.4 p54
Superficie interna Cold Leg	18.8	m2	[UK-EPR,2009]cap5.4 p54
Spessore	76-97	mm	[UK-EPR,2009]cap5.4 p54
Diametro interno	780.	mm	[UK-EPR,2009]cap5.4 p54
Linea del pressurizzatore	**Valore**	**Unità**	**Riferimento**
Pressione di design	17.6	MPa	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-56
Temperatura di design	362.	°C	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-56
Diametro interno	325.5	mm	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-56
Spessore	40.5	mm	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-56
Diametro esterno	406.4	mm	[UK-EPR,2009]cap5.4 p50
Massime perdite di pressione	0.5	MPa	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-56
Sviluppo in lunghezza	27500	mm	[UK-EPR,2009]cap5.4 p57
peso	10000	kg	[UK-EPR,2009]cap5.4 p57
Materiale	X2CrNiMo		[UK-EPR,2009]cap5.4 p57
Pendenza	5°	gradi	
Pressurizer Spray Lines	**Valore**	**Unità**	**Riferimento**
Pressione di design	17.6	MPa	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-56
Temperatura di design	362.	°C	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-56
Nominal pipe size	101.6	mm	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-56

7.6 Pressurizzatore

Il pressurizzatore regola la pressione del sistema di raffreddamento del reattore (RCS) sia durante il transiente che l'assetto stazionario dell'impianto mantenendo una mistura saturata di acqua e vapore.
Il pressurizzatore è un vessel verticale cilindrico con terminazioni emisferiche sul fondo e sulla cima del contenitore: la linea del pressurizzattore connette il pressurizzatore, attraverso un bocchello posizionato nella parte centrale del fondo del contenitore, alla linea di raffreddamento del reattore in corrispondenza della gamba calda del loop 3.

Nella parte alta del pressurizzatore sono presenti due linee di spray collegate a due gambe fredde (una è la linea del loop 3) ed un'altre linea di spray ausiliaria che subentra in caso di incidente con acqua a temperatura inferiore a quella delle altre due linee, con lo scopo di ridurre la pressione.

Sul fondo del contenitore sono altresì presenti una serie di riscaldatori per riscaldare l'acqua per mantenere la condizione di saturazione del vapore. Vi sono 2 gruppi di riscaldatori che vanno solo in modalità On-Off ed un riscaldatore proporzionale per il controllo fine della pressione. I riscaldatori hanno sistemi di controllo che tolgono potenza quando non sono coperti con l'acqua.

In condizioni di funzionamento a piena potenza, il 50% del volume del pressurizzaztore è occupato da acqua ed il resto da vapore.

In cima al pressurizzatore sono presenti tre valvole di sfogo che scaricano nel serbatoio di sfogo del pressurizzatore ed un'altra valvola collegata ad una linea dedicata di spurgo in caso di incidente severo. Sono inoltre presenti 8 ugelli per la misurazione della pressione e del livello dell'acqua: 4 sono posti sopra la linea degli spray e 4 sotto il piatto di sostegno dei riscaldatori. Vi sono poi sensori di temperatura ed un ugello posto nella parte bassa del pressurizzatore per il prelievo del refrigerante in fase liquida.

Vi è inoltre una flangia posta sulla parte superiore del pressurizzatore per l'ispezione da operatore ed una valvola di ventilazione per il degasamento dei gas non condensabili.

Il pressurizzatore è realizzato in acciaio ferritico rivestito internamente con acciaio inossidabile austenitico in tutte quelle parti a contatto con il liquido di raffreddamento del reattore.

Descrizione	**Valore**	**Unità**	**Riferimento**
Pressione progetto	17.6	MPa	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-57
Temperatura progetto	362	°C	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-57
Pressione nominale di funzionamento	15.41	MPa	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-57
Temperatura nominale di funzionamento	345	°C	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-57
Peso struttura	150000	kg	[UK EPR,]cap 5.4 p69
Volume lordo interno (T nom)	75	m3	[UK EPR,]cap 5.4 p69
Lunghezza del pressurizzatore	14400	mm	[UK EPR,]cap 5.4 p69
Diametro interno nominale	2820	mm	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-57
Diametro esterno	3115	mm	[UK EPR,]cap 5.4 p69
Raggio interno dei terminali semisferici	1430	mm	[UK EPR,]cap 5.4 p69
Spessore	140	mm	[UK EPR,]cap 5.4 p69
Spessore Cladding	5	mm	[UK EPR,]cap 5.4 p69
Altezza attacco pressurizzatore rispetto gamba calda	8512	mm	
Volume di acqua	40	m3	
Volume vapore	35	m3	

Minimo volume del vapore		25.0	m3	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-57
Massimo flusso degli spray (entrambe le linee spray)		60.02	Kg/s	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-57
Flusso Continuo spray (per normal spray line)		0.35	Kg/s	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-57
Ugelli	**Quantità**	**Diametro**	**Unità**	**Riferimento**
Linea alla gamba calda	1	325	mm	[UK EPR,]cap 5.4 p69
Valvole di sfogo	3	132	mm	[UK EPR,]cap 5.4 p69
Linee di spray loop 2 e 3 gamba fredda	2	DN 100	mm	[UK EPR,]cap 5.4 p69
Linea spray ausiliaria	1	DN 100	mm	[UK EPR,]cap 5.4 p69
Valvolo di sfogo dedicata (bleed)	1	132	mm	[UK EPR,]cap 5.4 p69
Ugello ventilazione	1	6609	mm	[UK EPR,]cap 5.4 p69
Bocchello ispezione	1	533	mm	[UK EPR,]cap 5.4 p69
Riscaldatori	116	23	mm	[UK EPR,]cap 5.4 p69
Riscaldatori		**Valore**	**Unità**	**Riferimento**
P scaldante (tot per 3 gruppi)		2592	kW	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-59
Riscaldatori gruppo 1		576	kW	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-59
Riscaldatori gruppo 2		1296	kW	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-59
Riscaldatori proporzionali		720	kW	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-59
Diametro esterno delle barre		22	mm	[UK EPR,]cap 5.4 p68
Lunghezza scaldante nel pressurizzatore		1200	mm	[UK EPR,]cap 5.4 p68
Numero di riscaldatori		108	N°	[UK EPR,]cap 5.4 p68
Massima potenza superficiale		3200	W/mm2	[UK EPR,]cap 5.4 p68
Potenza installata/ volume Pressurizzatore		34.56	kW/m3	[UK EPR,]cap 5.4 p68
Spray		**Valore**	**Unità**	**Riferimento**
Massimo flusso degli spray (entrambe le linee spray)		60.02	Kg/s	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-57
Flusso Continuo spray (per normal spray line)		0.35	Kg/s	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-57

7.7 *Serbatoio di sfogo del pressurizzatore (PRT)*

Il PRT condensa e raffredda il vapore scaricato dal pressurizzatore dalle valvole di sicurezza lungo un condotto sommerso. Il raffreddamento è coadiuvato da una serie di spray. Due dischi di rottura forniscono una protezione alla sovrappressione. I gas, specialmente l'idrogeno, raccolti nel serbatoio del pressurizzatore sono raccolti in un sistema per il trattamento dei gas. Il serbatoio è progettato per accogliere il 110% del vapore presente nel pressurizzatore in condizione di piena potenza. Il serbatoio è un cilindro orizzontale in acciaio inossidabile austenitico.

In tabella sono riportati i principali dati del serbatoio.

Tabella 10: principali dati del serbatoio

Descrizione	Valore	Unità	Riferimento
Pressione di progetto	2.5	MPa	[UK EPR,]cap 5.4 p81
Temperatura di progetto	224	°C	[UK EPR,]cap 5.4 p81
Pressione iniziale	0.10	MPa	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-60
Temperatura iniziale	54.4	°C	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-60
Volume interno	40	m3	[UK EPR,]cap 5.4 p81
Volume iniziale di acqua	31-33 (a 55 °C)	m3	[UK EPR,]cap 5.4 p81
Volume iniziale di gas	9		[UK EPR,]cap 5.4 p81
Pressione set dischi di rottura	1.9	MPa	[UK EPR,]cap 5.4 p81
Diametro disco di rottura	711.2	mm	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-60

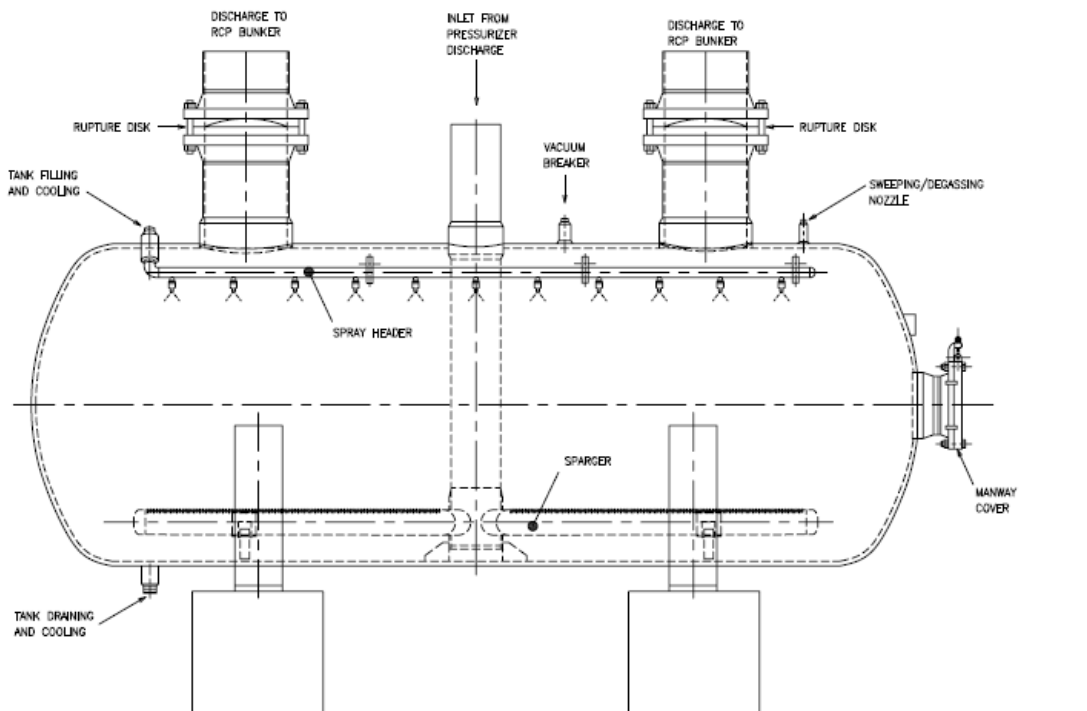



Figura 8: Schema del serbatoio di sfogo delpressurizzatore

7.8 Post-accident high point vents

The RCS is equipped with post-accident high point vents to remove non-condensable gases from the RPV for beyond design basis accident mitigation.

The post-accident high point vents connect to a branch tee in the RPV high point vent line, which is used during shutdown and startup operations for RCS venting and sweeping, upstream of the RPV high point vent isolation valves. The configuration is shown in Figure 5.1-4.

The post-accident high point vents branch into two parallel flow paths with each vent path containing two solenoid-operated isolation valves in series to allow for isolation of the vent path in the event that one valve fails to close. The isolation valves are failclosed, normally closed valves. Each isolation valve is powered from a separate Class 1E division.

Both flow paths merge into a common line, which discharges to the nearest SG cubicle through an orifice sized to prevent a discharge flowrate exceeding the capacity of one CVCS pump. The SG cubicle is equipped with rupture and convection foils at the top to allow circulation of air for adequate mixing of any combustible gases with the containment atmosphere.

The high point vents form part of the RCPB and are designed and fabricated in accordance with ASME Boiler and Pressure Vessel Code (Reference 1), Section III, Class 1 requirements. Post-accident high point vent component classifications are presented in Section 3.2.

Descrizione	**Valore**	**Unità**	**Riferimento**
Pressione set	17.5 ± 0.15	MPa	[UK EPR,]cap 5.4 p89
Tempo di apertura	<0.1	sec	
Area di gola	2580	mm2	
Flusso di scarico	0.25	kg/s	[UK EPR,]cap 5.4 p89
Temperatura massima consentita	600	°C	[UK EPR,]cap 5.4 p89
Temperatura di utilizzo	363	°C	[UK EPR,]cap 5.4 p89

7.9 Valvole di sfogo del pressurizzatore

Per evitare una eccessiva sovrapressione all'interno del pressurizzatore, sonoistallate 3 valvole di sovrapressione e 3 linee che scaricano il vapore in eccesso nel serbatoio di spurgo.

Each PSRV is equipped with two solenoid-operated pilot valves mounted in series and a spring-operated pilot valve. The spring-operated pilot valve operates the PSRV in hot conditions. The solenoid-operated pilot valves operate the PSRV during low temperature operations.

Descrizione	**Valore**	**Unità**	**Riferimento**
Pressione progetto	17.6	MPa	[UK EPR,]cap 5.4 p86
T progetto	362	°C	[UK EPR,]cap 5.4 p86
Numero Valvole di sicurezza	3		[UK EPR,]cap 5.4 p86
Tempo di apertura	0.7	sec	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-61
Pressione set 1	17.5 ± 0.15	MPa	[UK EPR,]cap 5.4 p86
Pressione set 2	17.8 ± 0.15	MPa	[UK EPR,]cap 5.4 p86
Pressione set 3	18.1 ± 0.15	MPa	[UK EPR,]cap 5.4 p86
Minima capacità di scarico per PSRV	83.3	kg/s	[UK EPR,]cap 5.4 p86
Area gola valvola	2970	mm2	[U.S.-EPR, 2008]p5.4-61
Pressione minima a valle	0.12	MPa	[UK EPR,]cap 5.4 p86
Pressione massima durante lo scarico a valle	5.1	MPa	[UK EPR,]cap 5.4 p86

7.10 Riferimenti Bibliografici

[UK-EPR, 2007] *Fundamental Safety Overview*, HSE - UK-EPR, 2007;

[U.S.-EPR, 2008] U.S. EPR final safety analysis report, NRC, 8/2008;

8 Generatori di vapore

Responsabile del Capitolo	RSE
Organizzazioni contribuenti	UniPa-DIN - Palermo
	UniRoma

8.1 Generatori di Vapore

I generatori di vapore (GV) costituiscono l'interfaccia tra l'acqua (fluido refrigerante) del circuito primario, riscaldata dal combustibile nucleare, e l'acqua del circuito secondario. L'acqua del circuito primario fluisce all'interno del fascio tubiero del GV e trasferisce l'energia, asportata dal core, all'acqua del circuito secondario per produrre il vapore richiesto per il funzionamento della turbina. Ogni GV è composto da due sottoparti: una che assicura la vaporizzazione dell'acqua alimento del circuito secondario, l'altra che essicca meccanicamente la miscela vapore-acqua prodotta al suo interno.

I GV costituiscono il posso termico del circuito primario sia in condizioni nominali sia in condizioni incidentali quali gli incidenti di riferimento ("Design Basis Accidents" – DBA). Essi formano una parte dell'RCPB e una barriera al rilascio di prodotti di fissione, in modo che il RCS sia mantenuto in pressione durante tutti i modi di funzionamento, tranne che nella sostituzione del combustibile e nell'ispezione durante il funzionamento ("InService Inspection" – ISI) dal lato primario.
I principali dati di progetto di un GV sono riportati nella Tabella 11.

8.2 Caratteristiche strutturali e di funzionamento

I GV sono verticali, con tubi a U, a circolazione naturale, e separatori di vapore integrati .
L'impianto consta di 4 GV, uno per ogni loop come si vede in Figura 9.

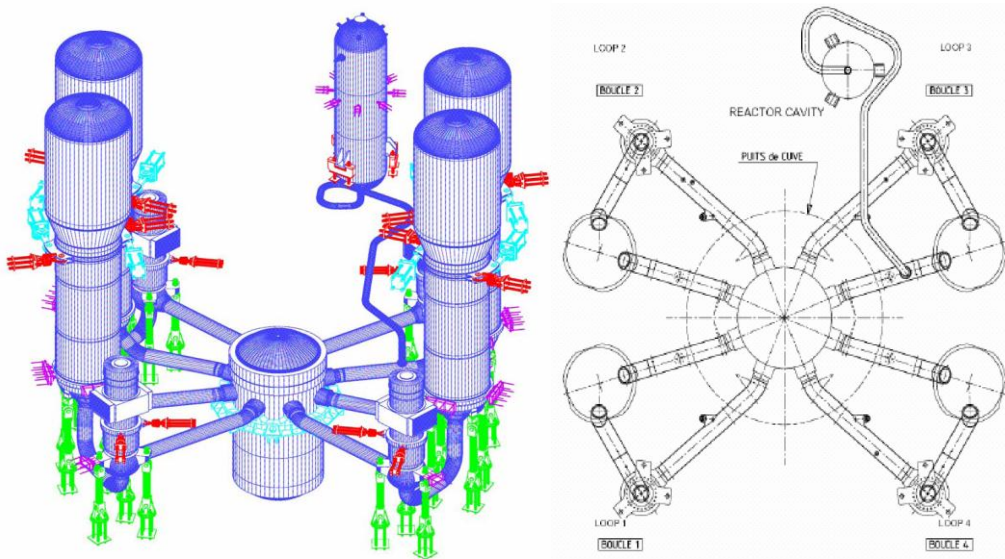



Figura 9: Vista frontale e dall'alto dei 4 GV.

Ogni GV è sostenuto verticalmente da quattro gambe di sostegno e lateralmente da guide a due altezze. Il sistema di sostegno del GV è progettato per permettere l'espansione termica del circuito e lo spostamento indotto dalla pressione.

Le parti principali di ogni GV si possono descrivere come segue.

- Sul lato primario, il refrigerante del reattore fluisce attraverso i tubi a U , entrando e uscendo attraverso bocchelli che si trovano nel fondo emisferico del GV. L'estremità inferiore è divisa da un setto di separazione (partition plate) che si estende dall'apice del fondo emisferico fino alla piastra tubiera (tubesheet).
- Un passo d'uomo fornisce accesso a ciascun lato dell'estremità dei canali per l'ISI dei tubi, per tappare i tubi e per le operazioni di manutenzione. L'ingresso del fondo emisferico del GV è

collegato all'estremità di una gamba calda uscente dal vessel mentre la sua uscita è collegata, tramite la pompa di circolazione e una delle gambe fredde, all'ingresso del vessel.

- La parte inferiore del lato secondario del GV è formata da un mantello cilindrico e da un guscio conico. È equipaggiata con otto portellini d'ispezione nella parte inferiore del mantello cilindrico utili per le operazioni di manutenzione e per la rimozione dei fanghi accumulati.
- Le estremità dei tubi a U sono saldate a tenuta al rivestimento della piastra tubiera, e ogni tubo viene dilatato lungo lo spessore della piastra tubiera tramite un processo idrualico per eliminare le fessure tra il tubo e la piastra tubiera (le apparecchiature e la procedura per l'espansione dei tubi minimizzano le tensioni residue nella transizione dalla zona espansa a quella non espansa).
- Ci sono nove piastre di supporto dei tubi ("Tube Support Plates" – TSPs) distanziate tra di loro lungo l'altezza del fascio tubiero. Le TSP hanno fori brocciati a trifoglio con le parti piene piatte per eliminare il "dryout" (asciugamento) e permettere il libero deflusso della miscela vapore-acqua nel lato mantello del GV. Il materiale delle TSP è acciaio inossidabile martensitico resistente alla corrosione, che limita il potenziale danneggiamento dei tubi che può derivare dal deposito di prodotti di corrosione nello spazio tra tubo e sostegno.
- La parte superiore del lato secondario del GV è formata da un mantello cilindrico e da una calotta ellittica. È equipaggiata con due passi d'uomo nella parte superiore del mantello cilindrico, per permettere l'accesso alle parti interne poste nella parte superiore.
- L'acqua d'alimento entra nel GV ad una quota più elevata rispetto all'estremità superiore dei tubi a U. Il vapore generato nel lato mantello , fluisce verso l'alto uscendo attraverso il bocchello posto in cima al GV. Il notevole volume del corpo cilindrico superiore (ossia il volume di vapore), unitamente ad una pressione di iniezione di sicurezza inferiore rispetto alla pressione di riferimento delle valvole di sicurezza del secondario, è volto ad impedire ai GV di riempirsi d'acqua in caso di rottura dei tubi dei GV, per evitare rilasci di liquido all'ambiente.
- In fondo all'involucro, l'acqua viene diretta verso il centro del fascio di tubi da un deflettore di distribuzione di flusso. La progettazione del deflettore minimizza la tendenza del fluido a bassa velocità a depositare fanghi nel fascio tubiero. La miscela vapore-acqua, formatasi nel fascio tubiero, percorrendolo dal basso verso l'alto, continua fino al gruppo essiccatore che rimuove l'umidità.
- la sezione separatori fornisce vapore all'uscita del GV con un contenuto di umidità che non supera lo 0.25 % in normali condizioni operative con turbina in funzione includendo possibili variazioni di carico a gradino e a rampa. Il vapore secco esce dal GV attraverso il bocchello d'uscita del vapore, posto nella sommità del GV, che possiede un riduttore di portata.

Le parti costituenti il GV sono saldate tra di loro e presentano un collettore dell'acqua alimento. Questa progettazione minimizza gli effetti di colpo d'ariete evitando di prosciugare il collettore nel caso il livello dell'acqua scenda al di sotto del collettore stesso. Inoltre il circuito interno di distribuzione dell'acqua di alimento è inclinato in modo continuo verso l'alto per impedire la stratificazione termica.

Le progettazioni dei sistemi dell'acqua d'alimento principale e di emergenza e la loro separazione fisica ulteriormente eliminano i rischi di colpo d'ariete e minimizzano gli effetti di stratificazione termica, come descritto nella Sezione 10.4.7 e Sezione 10.4.9, rispettivamente.

Sono prese precauzioni per minimizzare la formazione di fanghi nel GV su trattamento della chimica dell'acqua lato secondario. Inoltre, la sezione inferiore del lato secondario del GV è progettata per incidere i fanghi che possono accumularsi sulla piastra tubiera nelle aree di bassa velocità.

Particolare attenzione è stata rivolta nella progettazione del GV all'eliminazione dei moti trasversali nel fascio tubiero , per proteggere il fascio tubiero contro i rischi di vibrazione.

8.3 Accessibilità e ispezionabilità

I GV sono realizzati prevedendo accessi facili per permettere le ispezioni e la manutenzione del fascio tubiero.

I GV sono posizionati ad un'altezza, rispetto al "vessel" del reattore, che permette il drenaggio del lato mantello del GV per l'ispezione e riparazione mantenendo la refrigerazione del core in condizioni di shutdown. Sono previsti dispositivi di chiusura dei bocchelli d'ingresso e d'uscita del fluido primario al fine di condurre operazioni di ispezione e eventuali riparazione sul lato primario del GV in parallelo alle operazioni di ricarica del combustibile.

La progettazione del "pressure boundary" GV riduce il numero di saldature e ottimizza la loro geometria per agevolare l'ISI. Il coperchio superiore e il bocchello d'uscita del vapore del "duomo vapore" sono realizzati con una singola forgiatura. Il guscio conico è forgiato e ha estremità diritte per agevolare l'ispezione delle saldature di collegamento. È fornito un isolamento rimovibile per l'accesso alle saldature. Le caratteristiche di progettazione permettono l'ispezione e la manutenzione delle parti interne del GV.

Sul lato primario, le gambe di sostegno permettono facile accesso al passo d'uomo per ogni lato della cassa d'acqua Questo permette l'ispezione della superficie interna della cassa d'acqua in contatto con il refrigerante del circuito primario, l'ispezione del tubo verso le saldature del rivestimento della piastra tubiera e l'ispezione del fascio di tubi.

Il lato primario dei tubi del GV è accessibile attraverso passi d'uomo primario situati nella cassa d'aqua primaria , uno in corrispondenza della gamba calda e uno in corrispondenza della gamba fredda. La "cassa d'acqua primaria" ha anche una sezione cilindrica diritta tra la piastra tubiera e la parte di calotta sferica per permettere una maggiore accessibilità ai tubi che si trovano alla periferia del fascio tubiero. Questa configurazione agevola l'ispezione dell'intera lunghezza di ogni tubo tra la saldatura tubo-piastra tubiera all'ingresso dei tubi e la saldatura tubo-piastra tubiera all'uscita dei tubi. Supporta anche la chiusura (compresa la stabilizzazione) richiesta se l'ispezione rileva difetti inaccettabili e i tubi devono essere rimossi dal servizio. Le saldature tubo-piastra tubiera non sono considerate come parte del tubo.

Sul lato secondario, il progetto prevede l'accesso alla parte inferiore del fascio tubiero e alla piastra tubiera. Il lato secondario del GV è accessibile attraverso due passi d'uomo situati tra il separatore di umidità e le strutture dell'essiccatore nel corpo cilindrico nel "duomo vapore". Ci sono anche otto portellini d'ispezione distribuiti intorno al mantello del secondario, posti appena sopra la piastra tubiera, e due portellini di ispezione più piccoli. La cima del fascio tubiero è accessibile attraverso un portello d' accesso, che include anche tre aperture d'accesso più piccole per ispezioni video. Queste aperture permettono l'accesso per eventuali ispezioni del lato secondario del GV e la rimozione di oggetti estranei e di accumuli/depositi di fanghi.
La progettazione idraulica e meccanica delle parti interne inferiori, incluse la geometria dei blockers di flusso e la progettazione del sistema di drenaggio, è ottimizzata per agevolare le operazioni di incisione dei fanghi.

L'accesso alle parti interne superiori dentro il corpo cilindrico è fornito da due ampi passi d'uomo. Le barre antivibrazioni del fascio tubiero di tubi sono accessibili per mezzo di un portello .

8.4 Materiali del GV

I materiali usati per il GV sono riportati nella Tabella 12. I materiali del GV e le proprietà chimiche del refrigerante del reattore sono scelti per la loro tendenza a evitare degradazione o malfunzionamenti nelle condizioni associate a un normale funzionamento del reattore, a condizioni di manutenzione, verifica e incidenti postulati. I materiali del pressure boundary SG sono principalmente acciai a bassa lega. Tutte le superfici del GV normalmente in contatto con il refrigerante del reattore sono di lega 52/52M/152 o di acciaio inossidabile. I tubi e il setto di separazione dell'estremità dei canali sono di lega 690. Nessun materiale di lega 600 è usato nel GV.

Per assicurare l'integrità dei tubi del GV, i componenti in contatto con le i tubi del GV (ad esempio, le TSP, il deflettore di distribuzione di flusso) sono costruiti in acciaio inossidabile martensitico, come mostrato nella tab. 4.4. Questi materiali sono forniti nella condizione bonificata ("quenched and tempered"), per impedire rotture da tensocorrosione .

La scelta dei bulloni è basata sulle condizioni di servizio attese per limitare la loro suscettibilità a rotture da tensocorrosione.

Durante la fabbricazione, le tubazioni in Lega 690 sono sottoposte a ricottura e a processi di trattamento termici per aumentare la resistenza delle tubazioni alla tensocorrosione.

La tolleranza per la corrosione/erosione delle superfici esterne dell'acciaio al carbonio e dell'acciaio a bassa lega per il mantenimento della pressione del GV è 1/32 inch e per le superfici non di rivestimento delle parti interne è 1/16 inch.

8.5 Compatibilità delle tubazioni del GV con i fluidi refrigeranti del circuito primario e del circuito secondario

Le proprietà chimiche dell'acqua dell'RCS e del circuito secondario sono monitorate per minimizzare eventuali effetti negativi sull'integrità dei materiali.

Linee guide definiscono i controlli per monitorare le proprietà chimiche dell'acqua del circuito secondario per inibire danni ai tubi del GV e limitare la tendenza alla degradazione dei GV. Controlli delle proprietà chimiche dell'acqua sono effettuati in condizione operative, durante il funzionamento e in condizioni di spegnimento da freddo/wet layup.

La geometria a trifoglio dei fori brocciati delle TSP è meno suscettibile alla formazione di ambienti aggressivi che possono corrodere il materiale delle TSP, conducendo ad ammaccature delle pareti dei tubi o a corrosione del materiale delle tubazioni. Questa geometria porta anche a una riduzione della caduta di pressione del fluido sulle TSP, facendo così aumentare il rapporto di ricircolazione e la velocità del fluido nel fascio tubiero. Il deflettore di distribuzione di portata aumenta la velocità del flusso trasversale immediatamente al di sopra della piastra tubiera, per dirigere i fanghi al centro del fascio tubiero, dove sono situate le aspirazioni verso le tubazioni di drenaggio.

I GV sono progettati per accelerare il flusso nelle regioni centrali del fascio di tubi minimizzando il deposito di fanghi.

8.6 Controllo delle impurità lato secondario

Per limitare l'accumulo d'impurità nel GV, si può o limitare l'ingresso degli inquinanti o agevolare la loro rimozione.

Il programma di trattamento della chimica dell'acqua presente nel lato secondario del GV e i materiali di costruzione del sistema secondario sono scelti per minimizzare la corrosione dovuta all'efflusso e la formazione di prodotti di corrosione. I materiali includono tubazioni di acciaio inossidabile nei riscaldatori dell'acqua alimento e nei riscaldatori dei separatori.Un sistema demineralizzatore del condensato a flusso parziale è fornito per l'uso durante l'avviamento e lo spegnimento e nel caso di una perdita di un tubo del condensatore.

Il sistema di drenaggio ha capacità sufficiente per la rimozione delle impurità. Durante gli spegnimenti, il materiale accumulato (depositi superficiali, fanghi, e prodotti di corrosione) può essere rimosso dal lato secondario dei GV mediante pulizia chimica, o altre tecniche altrettanto efficaci. Questo aiuta a proteggere ulteriormente i GV da danni dovuti all'accumulo di prodotti di corrosione e a contaminazione.

8.7 Prestazioni in termini di integrità strutturale

I tubi del GV durante il loro funzionamento devono mantenere l'integrità strutturale in tutta la gamma di condizioni operative (inclusi l'avviamento, il funzionamento in potenza, in condizioni tempo dipendeti presi in considerazione in sede di progetto) e nei DBA. Ciò comprende il mantenimento di un fattore di sicurezza di 3.0 contro lo scoppio sotto il differenziale di pressione tra primario e secondario in condizioni stazionarie di piena potenza, e di un fattore di sicurezza di 1.4 contro lo scoppio sotto il differenziale di pressione tra primario e secondario relativo a condizioni di DBA. Oltre a tali requisiti, devono essere valutate anche condizioni di carico aggiuntive dovute a DBA, o l'unione di scenari incidentali in accordo con i principi di di progetto e di licencing, per determinare se i carichi associati contribuiscano significativamente a scoppi o crolli. Nella valutazione dell'integrità dei tubi, quei carichi che influiscono significativamente su scoppi o crolli devono essere determinati e valutati in combinazione con i carichi dovuti alla pressione, con un fattore di sicurezza di 1.2 sui carichi primari combinati e 1.0 su carichi secondari assiali.

8.8 Prestazioni in termini di perdite

La fuoriuscita di fluido primario verso il circuito secondario, attraverso il GV, deve essere limitata a 150 galloni al giorno(ci si basa su "operational leakage performance criterion in NEI 97-06"). Il limite è basato su esperienza operativa legata ai meccanismi di degrado dei tubi del GV che portano a perdite dai tubi. Il criterio della velocità di perdita durante il funzionamento è una misura efficace per minimizzare la frequenza delle rotture dei tubi di GV.

Le perdite che si destano dal circuito primario a quello secondario sono determinate usando sistemi di monitoraggio continuo, in accordo con the EPRI PWR Primary-to- Secondary Leak Guidelines.

La velocità di perdita dal circuito primario al circuito secondario, indotta da incidenti per qualunque DBA, eccetto che per la rottura di un tubo del GV, non deve superare la velocità di perdita assunta nell'analisi di incidente in termini di velocità di perdita totale per tutti i GV e velocità di perdita per un singolo GV.

8.9 Sostegni dei componenti

I sostegni e vincoli dell'RCS controllano lo spostamento relativo dei componenti del sistema dovuto alla normale espansione termica e dovuta alla pressione, e limitano lo spostamento durante eventi sismici e DBA. Le tubazioni dell'RCS sono sostenute e trattenute dai componenti RCS principali.

I sostegni sono progettati in conformità con la Sezione ASME III, Sottosezione NF. I sostegni sono progettati per sopportare le combinazioni di carico specificate nella Sezione 3.9.3, in conformità con RG 1.124 e RG 1.130.

I sostegni e vincoli dell'RCS funzionano per sostenere e trattenere i componenti dell'RCS e le tubazioni ad esso collegate, per mantenere l'integrità dell'RCPB e mantenere la capacità dei componenti di svolgere funzioni di sicurezza in caso di DBA, compredendo i terremoti di magnitudo limite per lo spegnimento in sicurezza

Ispezioni preservice e inservice dei sostegni e delle limitazioni sono condotte in conformità con la Sezione ASME XI, Sottosezione IWF. I respingenti sono ispezionati in conformità con il Codice ASME per il funzionamento e la manutenzione delle centrali nucleari (Codice OM: "Code for Operation and Maintenance of Nuclear Power Plants – OM Code).

Le posizioni dei sostegni e dei vincoli permettono l'accesso a componenti e tubazioni per l'ISI. I sostegni e vincoli dell'RCS sono progettati in modo che tutta la manutenzione e l'ISI possano essere effettuate mantenendo l'esposizione del personale ragionevolmente bassa. La Figura 12 mostra i sostegni e vincoli dei GV.

Il GV è sostenuto verticalmente da quattro sostegni equipaggiati con perni in ciascuna estremità. Due vincoli più bassi permettono il movimento laterale dei GV durante la normale espansione termica e vincolano il loro movimento nel caso di carichi sismici. Ogni vincolo consiste in una piastra serrata alla parete di scompartimento su cui è montato un sistema di sostegno strutturale che fornisce uno spazio vuoto tra se stesso e la cassa d'acqua del GV. La struttura di sostegno permette l'aggiustamento dello spazio vuoto tra il GV e i fermi. Quattro montanti di oscillazione orizzontali vincolano il guscio superiore del GV e permettono l'espansione laterale lungo l'asse RPV-SG. Respingenti , posti lungo questo asse,limitano la velocità di movimento, vincolando movimenti improvvisi causati da un terremoto e permettono movimenti lenti dovuti all'espansione o contrazione del circuito.

I respingenti sono montati su ball-jointed end fittings che evitano che la formazione di momenti dovuti a carichi laterale decentrati. I sostegni sono serrati a staffe saldate all'estremità del GV e alla parete del compartimento di calcestruzzo all'altra estremità.

Tabella 11: Principali dati di progetto di un GV

Parametro	Valore di progetto	Riferimento
Pressione di progetto, circuito primario	2535 psig = 176 bar	[1], [2]
Pressione di progetto, circuito secondario	1435 psig = 100 bar	[1], [2]
Temperatura di progetto, circuito primario	664 °F = 351 °C	[1], [2]
Temperatura di progetto, circuito secondario	592 °F = 311 °C	[1], [2]
Area del limitatore di portata di uscita del vapore	1.39 ft^2 = 1291.352256 cm^2 = 0.1291 m^2	[2]
Area totale della superficie di scambio termico	85681 ft^2 = 7960.02537024 m^2	[2]
Numero di tubi a U	5980	[1], [2]
Diametro esterno dei tubi a U	0.750 in = 1.905 cm	[1], [2]
Spessore nominale della parete dei tubi	0.043 in = 0.109 cm	[1], [2]
Spessore minimo della piastra tubiera	24.41 in = 62.0014 cm	[2]
Pitch triangolare	27.43 mm	[1]
Altezza complessiva	23 m	[1]
Massa totale	500 t	[1]
Temperatura acqua alimento	230 °C	[1]
Moisture carry – over	0.1%	[1]
Portata vapore principale in condizioni nominali	2554 kg/s	[1]
Temperatura vapore principale	293 °C	[1]
Pressione di saturazione	78 bar	[1]
Pressione in hot stand by	90 bar	[1]
Tempo di prosciugamento ("dry-out time") del GV in caso di perdita di tutti i sistemi dell'acqua alimento	>= 30 minuti (notevole massa di acqua sul lato secondario)	[1]

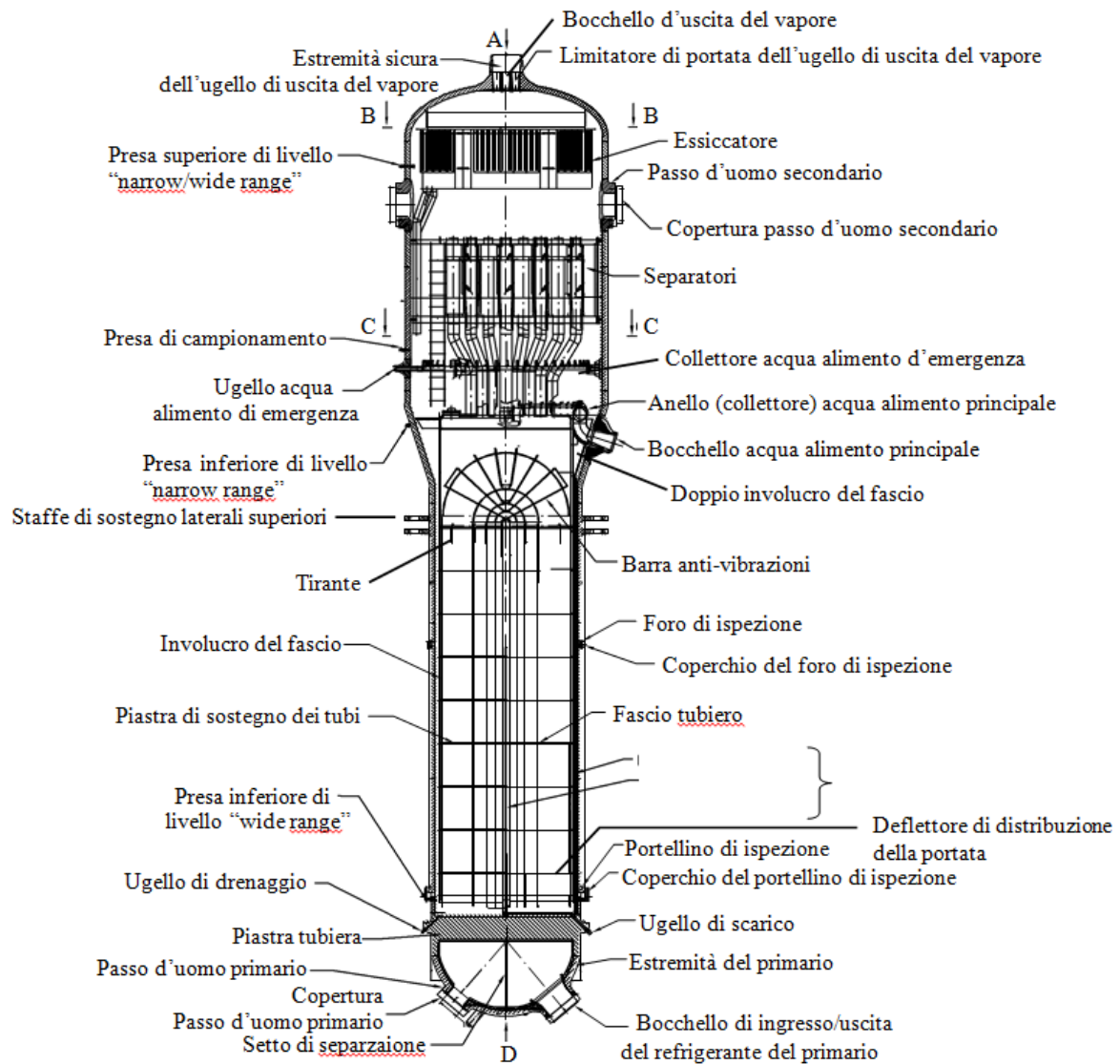



Figura 10: Vista del GV

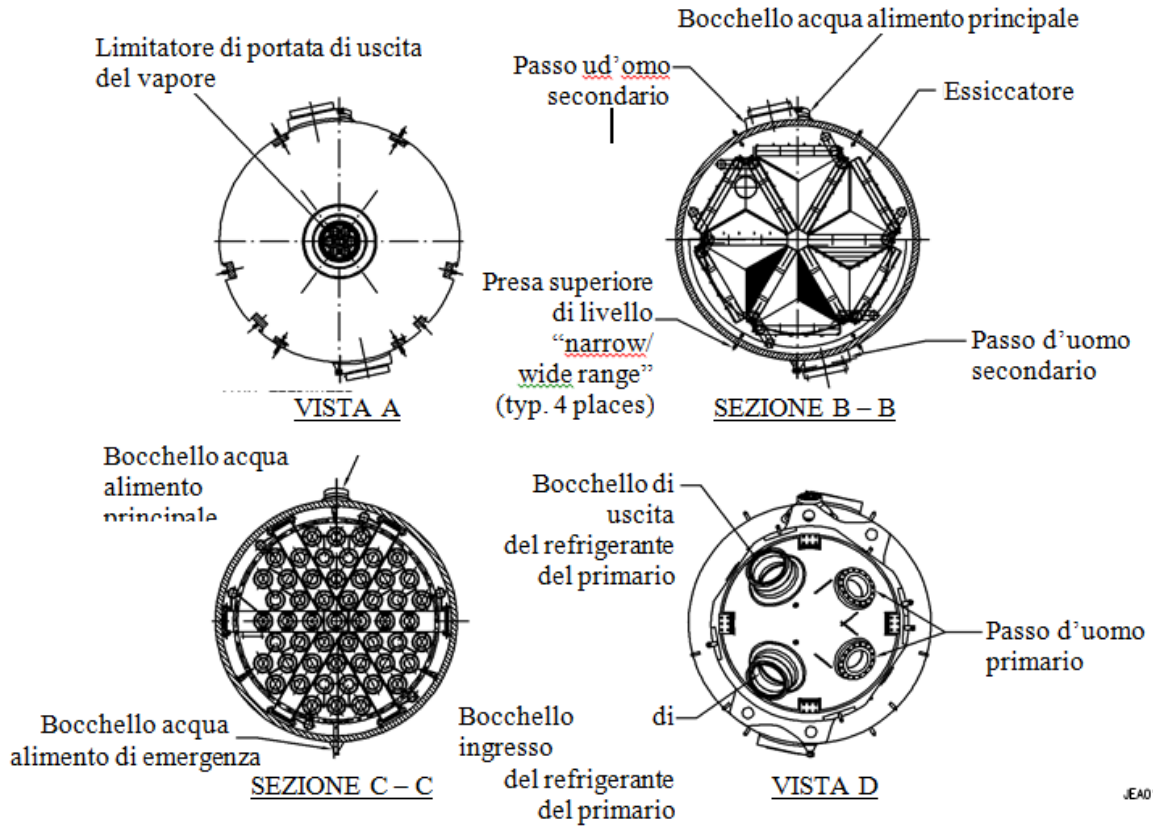



Figura 11 Sezioni GV

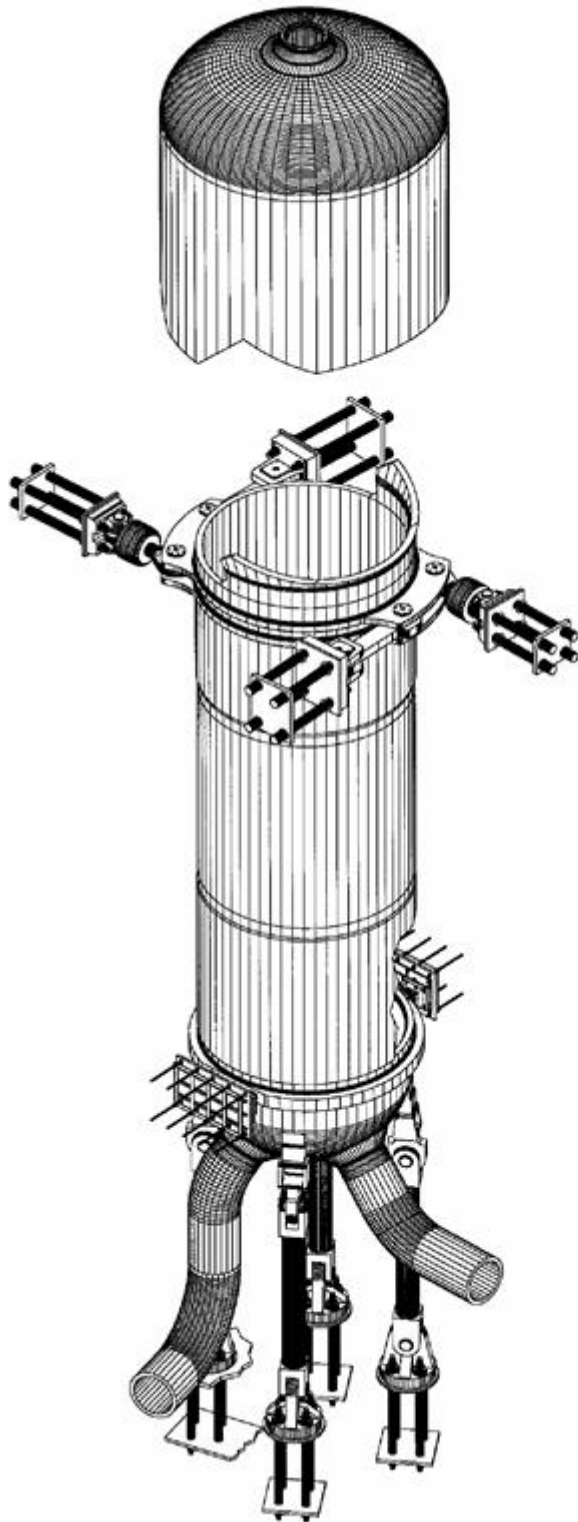



Figura 12: Sostegni del GV

Tabella 12: materiali usati per il GV

Componente	Materiale	Riferimento
Tubazioni RCPB		
Tubazioni del refrigerante del reattore e linea di espansione ("surge line")	ASME SA-182 Grade F304 (Note 3 e 4) ASME SA-336 Grade F304 (Note 3 e 4)	[2]
Tubazioni del refrigerante del reattore e raccordi della linea di espansione e ugelli	ASME SA-182 Grade F304 (Note 3 e 4) ASME SA-336 Grade F304 (Note 3 e 4)	[2]
Tubazioni del refrigerante del reattore non del circuito e linea di espansione	ASME SA-213 Grade TP304L (Seamless) (Note 3 e 4) ASME SA-312 Grade TP304L (Seamless) (Note 3 e 4) ASME SA-312 Grade TP316LN (Seamless) (Note 3 e 4)	[2]
Raccordi delle tubazioni del refrigerante del reattore e ugelli non nel circuito e raccordi della linea di espansione e ugelli	ASME SA-182 Grade F304L (Nota 3) ASME SA-182 Grade F316LN (Note 3 e 4) ASME SA-403 Grade WP304L Class S (Note 3 e 4) ASME SA-403 Grade WP316LN Class S (Note 3 e 4)	[2]
Generatori di vapore		
Pezzi forgiati del pressure boundary (inclusi shells, heads, piastra tubiera, ugelli e openings)	ASME SA-508 Grade 3 Class 2 (Nota 1)	[2]
Piccoli ugelli	ASME SA-105 (Nota 6)	[2]
Secondary nozzle safe ends (except emergency feedwater nozzle safe end)	ASME SA-508 Grade 3 Class 1 (Nota 1)	[2]
Emergency feedwater nozzle safe end	ASME SA-403 Grade WP316L (Seamless) (Note 3 e 4) ASME SA-182 Grade F316L (Nota 3)	[2]
Inlet & outlet nozzle safe ends	ASME SA-182 Grade F316 (Note 3 e 4) ASME SA-336 Grade F316 (Note 3 e 4)	[2]
Tubi	ASME SB-163 Alloy 690 (Nota 2)	[2]
Coperchi delle aperture (per i passaggi uomo, i fori di ispezione e i portellini di ispezione)	ASME SA-533 Type B Class 2 (Nota 1)	[2]
Perni delle aperture (per i passaggi uomo, i fori di ispezione e i portellini di ispezione)	ASME SA-193 Grade B16 (Nota 1) ASME SA-193 Grade B7 (Nota 1)	[2]
Primary manway studs	ASME SA-193 Grade B16 (Nota 1)	[2]
Openings nuts (per i passaggi uomo, i fori di ispezione e i portellini di ispezione)	ASME SA-193 Grade B16 (Nota 1) ASME SA-193 Grade B7 (Nota 1)	[2]
Pressurizzatore		[2]
Upper head	ASME SA-508 Grade 3 Class 2 (Nota 1)	[2]
Bottom head	ASME SA-508 Grade 3 Class 2 (Nota 1)	[2]

Gusci cilindrici	ASME SA-508 Grade 3 Class 2 (Nota 1)	[2]
Passaggio uomo	ASME SA-508 Grade 3 Class 2 (Nota 1)	[2]
Coperchio dei passaggi uomo	ASME SA-533 Type B Class 2 (Nota 1)	[2]
Ugello di Surge	ASME SA-508 Grade 3 Class 2 (Nota 1)	[2]
Ugelli delle valvole di	ASME SA-508 Grade 3 Class 2 (Nota 1)	[2]
Ugelli degli spray	ASME SA-508 Grade 3 Class 2 (Nota 1)	[2]
Ugello di Venting	ASME SA-508 Grade 3 Class 2 (Nota 1)	[2]
Ugello delle valvole del sistema di depressurizzazione del primario	ASME SA-508 Grade 3 Class 2 (Nota 1)	[2]
Safe ends: ● ugello dello spray ● ugello di Surge ● ugello delle valvole di sicurezza ● ugello delle valvole del sistema di depressurizzazione del primario Ugelli: ● misura della temperatura ● misura del livello ● campionamento (Sample)	ASME SA-182 Grade F316 (Note 3 e 4) ASME SA-336 Grade F316 (No e 3 e 4)	[2]
Manicotti dei riscaldatori	ASME SA-182 Grade F316 (Note 3 e 4) ASME SA-336 Grade F316 (Note 3 e 4)	[2]
Vent nozzle safe ends	ASM SA-182 Grade F316 (Note 3 e 4)	[2]
Vent manway nozzle	ASME SA-182 Grade F316 (Note 3 e 4)	[2]
Ugello pilota delle valvole	ASME SA-182 Grade F316 (Note 3 e 4)	[2]
Manway studs	ASME SA-193 Grade B16 (Nota 1)	[2]
Manway nuts	ASME SA-194 Grade 16 (Nota 1)	[2]
Pompa del refrigerante del reattore		
Pressure forgings	ASME SA-182M Grade F304 (Note 3 e 4)	[2]
Cooler tubes	ASME SA-213M Grade TP316 (Note 3 e 4)	[2]
Support stand flange – integral part of casing closure bolted assembly	ASME SA-216M Grade WCC	[2]
Pressure casting	ASME SA-351M Grade CF3 (Note 3 e 5)	[2]
Bolting	ASME SA-453M Grade 660 Class B (Nota 7)	[2]
Thermowell	ASME SA-479M Type 304 (Note 3 e 4)	[2]
Flange – integral part of pressure boundary casing closure bolted assembly	ASME SA-508M Grade 3 Class 2 (Nota 1)	[2]
Pressure boundary stud bolts & nuts	ASME SA-540M Grade B24 Class 1 (Nota 1)	[2]

Pressure boundary casing closure stud & nuts	ASME SA-540M Grade B24 Class 3 (Nota 1)	[2]
Shaft seal pressure boundary parts	ASME SA-705M Type 630 H1150 (Nota 7)	[2]
Pressure boundary welds	SFA 5.4 E308L SFA 5.4 E316L SFA 5.9 ER316L	[2]
Meccanismo di movimentazione delle barre di controllo		
Flange, connection piece, head, loose flange	ASME SA-479 Grade 347 (Nota 3)	[2]
Latch housing	ASME SA-479/SA-182 Grade F6NM (Nota 1) (UNS S41500)	[2]
Tubo senza saldatura	ASME SA-312 Grade TP347 (Seamless) (Nota 3)	[2]
Bullone	ASME SA-453 Grade 660 (Nota 7)	[2]
Dado	ASME SA-437 Grade B4C (Nota 1)	[2]
Materiale di riempimento delle saldature Welding filler material	SFA 5.4 E347 SFA 5.9 ER347 SFA 5.14 ERNiCrFe-7 SFA 5.14 ERNiCrFe-7A	[2]

Note alla Tabella 12:
1. Quenched and tempered
2. Solution annealed and thermally treated
3. Solution annealed and rapidly cooled
4. Contenuto di carbonio non superiore allo 0.03 wt%
5. Silicio non maggiore dell'1.5% e niobio limitato a tracce (trace elements)
6. Annealed, normalized, normalized and tempered, or quenched and tempered
7. Solution Treatment and Hardening

Tabella 13: Specifiche dei materiali per i componenti dell'RCPB

Componente	Materiale	Riferimento
Generatori di vapore		
Tubi	Lega Inconel 690 TT (TT: trattata termicamente – "Thermally Treated"), con uno specificato valore medio del contenuto di Co minore dello 0.015%	[1]
Involucro del fascio tubiero	Acciaio 18 MND 5	[1]
Piastra tubiera di cladding	Lega Ni Cr Fe	[1]
Piastre di sostegno dei tubi	Acciaio inossidabile migliorato 13% Cr	[1]

Tabella 14: Non-Pressure Boundary Steam Generator Materials

Parametro	Valore di progetto
Componenti	SA-240 Type 410
	Acciaio inossidabile martensitico

Tabella 15: Proprietà chimiche dell'acqua di raffreddamento del reattore – Parametri di controllo

Parametro di controllo	Condizioni di funzionamento normali
Litio (controllo del pH)	da 0.39 a 4.0 mg/kg
Idrogeno	da 17 a 28 cc(STP)/kg (da 1.5 a 2.5 mg/kg)
Ossigeno disciolto	< 0.100 mg/kg
Cloruro	< 0.150 mg/kg
Fluoruro	< 0.150 mg/kg
Solfato	< 0.150 mg/kg
Boro totale e boro 10	Come richiesto per il controllo della reattività

8.10 Sistema Valvole Linea Vapore

All'uscita di ciascun generatore di vapore è presente un sistema di tubazioni necessario per trasportare il vapore dal generatore di vapore stesso alla turbina. Tale sistema consiste nella tubazione principale del vapore, nei treni di valvole di sfioro della linea del vapore principale ("Main Steam Relief Train" – MSRT), nelle valvole di sicurezza della linea del vapore principale ("Main Steam Safety Valves" – MSSV) e nelle valvole di isolamento del vapore principale ("Main Steam Isolation Valves" – MSIV).

Alcune parti del sistema di produzione del vapore, al di fuori dei generatori di vapore, sono rilevanti ai fini della sicurezza; in particolare tali parti comprendono le tubazioni tra il bocchello di uscita di ciascun generatore di vapore e la valvola di isolamento relativa alla stessa linea vapore, incluse le seguenti valvole associate al ramo di tubazione (si veda la Figura 13):

- valvole di sicurezza della linea del vapore principale ("Main Steam Safety Valves" – MSSVs),
- treni di sfioro della linea del vapore principale ("Main Steam Relief Trains" – MSRTs),
- valvole di isolamento della linea del vapore principale ("Main Steam Isolation Valves" – MSIVs),
- valvole di regolazione del riscaldamento della linea del vapore principale ("Main Steam Warming Valves" – MSWVs).

8.10.1 Valvole di sicurezza della linea del vapore principale ("Main Steam Safety Valves" – MSSV)

Ogni linea principale del vapore è dotata di due valvole di sicurezza installate a monte della valvola di isolamento della linea principale del vapore ("Main Steam Isolation Valve" – MSIV). Le valvole di sicurezza della linea del vapore principale ("Main Steam Safety Valve" – MSSV), insieme ai treni di sfioro della linea del vapore principale ("Main Steam Relief Trains" - MSRTs), forniscono la protezione a sovrappressione delle linee principali del vapore e dei generatori di vapore. Le valvole di sicurezza scaricano direttamente nell'atmosfera attraverso una vent stacks. Un drenaggio, nella parte più bassa della vent stacks, veicola l'acqua accumulata nel canale di drenaggio dell'Edificio Turbina.

La soglia di intervento e la capacità delle MSSV sono tali che, considerando un arresto rapido del reattore ("Reactor Trip" – RT), le valvole di sicurezza possano, da sole, evitare che la pressione aumenti oltre il 110% del valore di progetto, in caso di perdita totale del carico. I principali dati di dimensionamento di tali valvole sono riportati nella Tabella 16.

Tabella 16: Dati di progetto delle valvole di sicurezza della linea del vapore principale

Parametro	**Valore di progetto**	**Riferimento**
Numero di valvole per ciascuna linea vapore	2	[3], [2]
Soglia di intervento, prima MSSV	1460 psig = 102 bar	[3], [2]
Soglia di intervento, seconda MSSV	1490 psig = 104 bar	[3], [2]
Capacità di smaltimento per ciascuna valvola	1,422,073 lb/hr = 179 kg/s	[3], [2]
Dimensione valvola	8 x 10 minimum	[3], [2]
Capacità di smaltimento per ciascuna linea vapore	2,844,146 lb/hr = 358 kg/s	[3], [2]
Normative di progettazione	ASME Code, Sezione III, Classe 2, Categoria sismica I	[3], [2]

8.10.2 Treni di sfioro della linea principale del vapore ("Main Steam Relief Trains" – MSRTs)

Ogni linea principale del vapore è dotata di un treno di valvole di sfioro della linea vapore (MSRT) istallato a monte della valvola di isolamento della stessa linea vapore (MSIV). Ognuno di questi treni è costituito da una valvola di sfioro di isolamento del vapore principale ("Main Steam Relief Isolation Valve" – MSRIV), normalmente chiusa e caratterizzata da apertura veloce, e una valvola di sfioro di controllo del vapore principale ("Main Steam Relief Control Valve" – MSRCV) a valle, normalmente aperta. I suddetti treni fanno parte dei sistemi di protezione dalla sovrappressione del secondario dei generatori di vapore. La soglia di intervento e la capacità del treno sono tali che, considerando un arresto rapido del reattore (RT), il treno di valvole possa, da solo, evitare che la pressione raggiunga valori superiori al 110% del valore di progetto, in caso di perdita totale del carico.
I treni di valvole scaricano in atmosfera attraverso appositi silenziatori e sono dotati di un drenaggio, nella zona bassa delle tubazioni di scarico, per minimizzare l'accumulo di condensa.

Durante i medi transitori di pressione, le MSRIV si aprono automaticamente per evitare l'apertura delle MSSV. Se il "bypass" della turbina non è disponibile, lo sfiato del vapore in atmosfera, attraverso le MSRIV, è necessario per rimuovere il calore residuo. Ciascuna MSRIV è una valvola a globo ad angolo con un attuatore a pistone comandato dalla forza motrice del vapore (motive steam-operated piston actuator).

Ciascun attuatore è dotato di un pistone nella valvola principale e le valvole pilota sono anch'esse azionate dalla forza motrice del vapore (motive steam). La valvola è chiusa dal bilanciamento del pistone principale attraverso il vapore presente su entrambi i lati dello stesso. Sopra al pistone principale è prevista una molla per contribuire a mantenere la valvola in posizione di chiusura. La valvola viene aperta rapidamente dallo sfiato del vapore sopra il pistone principale ed è mantenuta aperta, mantenendo entrambe le elettrovalvole pilota aperte (energizzate), in una o in entrambe le linee di controllo. Le MSRCV hanno la funzione di sicurezza nel controllare il flusso di vapore dei treni di valvole di sfioro al fine di evitare un eccessivo raffreddamento del refrigerante primario all'interno del reattore. Le MSRCV consentono la mitigazione degli effetti dovuti al fallimento in apertura di una valvola di sfioro di isolamento (MSRIV bloccata aperta).

Le regolazione dell'apertura delle MSRCV è effettuata, automaticamente, in base alla potenza termica secondo il seguente schema:

- dallo 0% al 20% della potenza termica, apertura 40%;
- dal 20% al 50% della potenza termica, variazione lineare tra il 40% e il 100% di apertura;
- per una potenza termica maggiore del 50 %, 100% di apertura.

I principali dati di dimensionamento delle MSRIV sono riportati nella Tabella 17.

Tabella 17: Dati di progetto di ciascuna valvola di sfioro di isolamento del vapore principale (MSRIV)

Parametro	**Valore di progetto**	**Riferimento**
Numero di valvole per ciascuna linea vapore	1	[3], [2]
Soglia di intervento	1370 psig = 94.46 bar	[3], [2]
Capacità di smaltimento	2,844,146 lb/hr = 0.538 kg/s	[3], [2]
Normativa di progettazione	ASME Code, Sezione III, Classe 2, Categoria sismica I	[3], [2]
Attuatore	Solenoid/Pilot, System Medium Powered, Open/ Closed	[3], [2]

8.10.3 Valvole di isolamento della linea vapore principale ("Main Steam Isolation Valves" – MSIVs)

Ciascuna linea vapore principale comprende una valvola di isolamento, che si trova nel locale valvole appena al di fuori del contenimento. Le valvole di isolamento hanno la funzione di sicurezza di isolare le linee vapore principali in caso di un eccessivo afflusso di vapore, al fine di prevenire un eccessivo raffreddamento del refrigerante primario all'interno del reattore.

In risposta ad un segnale di isolamento delle linee principali del vapore, le MSIV si chiudono rapidamente e in maniera automatica. Ogni MSIV è in grado di chiudersi in cinque secondi, o meno, in presenza di un flusso di circa 630 kg/s ($5x10^6$ lb_m / hr) e una pressione differenziale di 91 bar (1320 psi) in entrambe le direzioni.

L'attuatore, idraulico-pneumatico, è un attuatore a pistone caratterizzato dalla camera superiore caricata con azoto ad alta pressione e la camera inferiore collegata ad un sistema ad olio idraulico. L'azoto immagazzinato nella camera superiore funziona come una molla per chiudere la valvola. L'olio idraulico in dotazione alla camera inferiore serve per l'apertura della valvola.

La camera superiore dell'attuatore è chiusa ed è mantenuta costantemente ad alta pressione.
In caso di perdita del gas, la camera superiore è dotata di trasmettitori di pressione per avvertire l'operatore; nel qual caso, attraverso una bombola di gas azoto collegata alla camera superiore, è possibile ripristinare manualmente la pressione nominale.

Ciascun attuatore delle MSIV è dotato di un proprio sistema di olio idraulico che pompa l'olio da un serbatoio alla camera inferiore dell'attuatore. La chiusura veloce viene eseguita scaricando l'olio idraulico, presente nella camera inferiore dell'attuatore, nel serbatoio dell'olio mediante due linee ridondanti.

8.10.4 Valvole di regolazione del riscaldamento della linea principale del vapore ("Main Steam Warming Valves" – MSWVs)

Ogni valvola di isolamento comprende una linea di bypass per equilibrare la pressione ed il riscaldamento. Ogni linea di "bypass" è dotata sia di una valvola motorizzata, la "Main Steam Warming Isolation Valve", che di una "Main Steam Warming Control Valve" a valle. Le valvole di isolamento (MSWIV) e di controllo (MSWCV) sono normalmente chiuse e sono progettate rispettivamente in classe 2 e classe 3. Durante l'avviamento, le valvole di controllo sono posizionate opportunamente al fine di regolare il tasso di riscaldamento.

La Tabella 18 riassume le caratteristiche di sicurezza delle valvole finora citate.

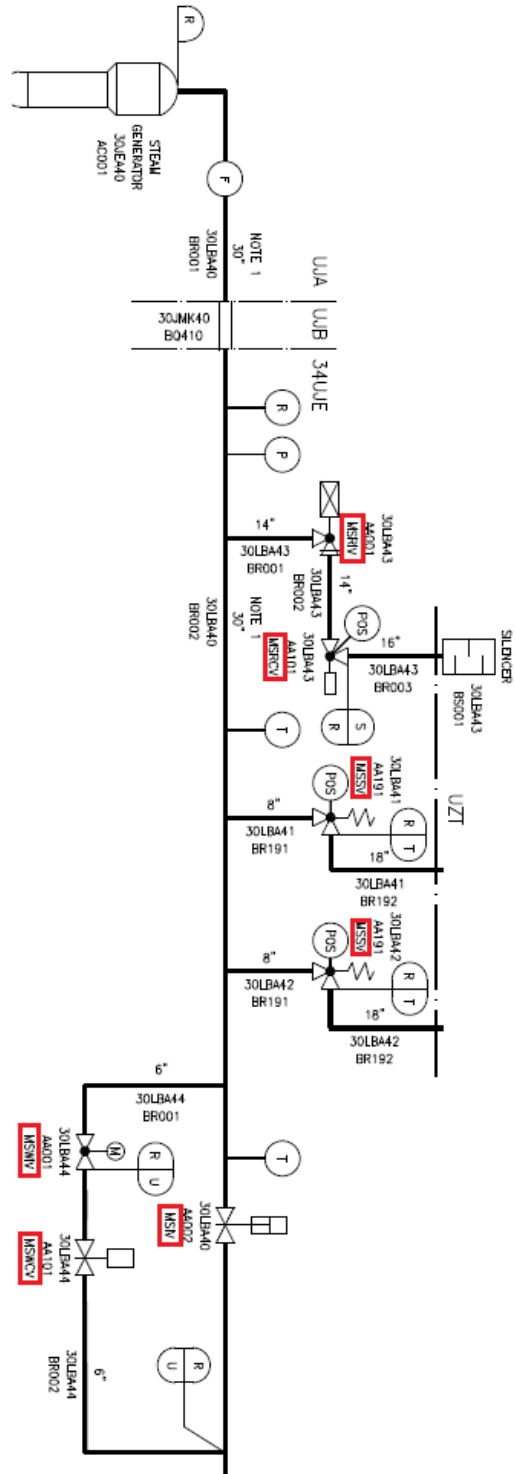



Figura 13: P&ID delle valvole della linea vapore principale

Tabella 18: Caratteristiche di sicurezza delle valvole del vapore principale

Descrizione del sistema o del componente	**Classificazione in classe di sicurezza**	**Classificazione in gruppi di qualità**	**Categoria sismica**	**Collocazione**	**Codice commerciale**
Main Steam Warming Control Valves (MSWCV)	S	C	I	UJE	ASME Class 3[11]
Main Steam Warming Isolation Valves (MSWIV)	S	B	I	UJE	ASME Class 2[12]
Main Steam Relief Control Valves (MSRCV)	S	B	I	UJE	ASME Class 2
Main Steam Relief Isolation Valves (MSRIV)	S	B	I	UJE	ASME Class 2
Valvole di sicurezza della linea principale del vapore *Main Steam Safety Valves (MSSV)*	S	B	I	UJE	ASME Class 2
Valvole di isolamento della linea principale del vapore *Main Steam Isolation Valves (MSIV)*	S	B	I	UJE	ASME Class 2

[11] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1, Subsection NC including Article NC-7000:“Overpressure Protection,” The American Society of Mechanical Engineers, 2004.

[12] ANSI/ASME B31.1-2004, “Power Piping,” The American Society of Mechanical Engineers, 2004.

8.11 Riferimenti Bibliografici

[1] Areva, Framatome ANP, EPR, brochure made by Euro RSCG, Paris, March 2005, http://www.areva-np.com/common/liblocal/docs/Brochure/BROCHURE_EPR_US_2.pdf, pp. 26-27;
[2] U.S. EPR Final Safety Analysis Report, volume 1, chapter 5;
[3] U.S. EPR Final Safety Analysis Report, tier 2, chapter 10 (rev.0);

9 Edificio di contenimento

Responsabile del Capitolo	ENEA
Organizzazioni contribuenti	UniPa-DIN - Palermo
	RSE
	UniRoma
	UniPi-GRNSPG

9.1 Caratteristiche Generali

Nel caso di un incidente severo il contenimento è l'ultima barriera per il controllo dei rilasci all'ambiente. Di conseguenza vi è la necessità di valorizzare strumenti di simulazione affidabili per descrivere la termo-termica del contenimento, compresa la distribuzione di idrogeno, i diversi regimi di combustione di idrogeno, il loro impatto sulle strutture del contenimento e le contromisure per prevenire o, almeno attenuare, gravi fenomeni di combustione.

L'edificio di contenimento (in seguito abbreviato come *contenimento*) considerato nel presente studio e riferito al reattore di studio Mille600, prende come riferimento altri tre tipi di reattori già esistenti o in avanzata fare di costruzione:

- Il tedesco KONVOI, cioè un impianto pressurizzato di II generazione a 4 – loops, da 3850 MW termici (1365 MWe), raffreddato e moderato con acqua leggera;

- Il francese N4, cioè un impianto pressurizzato di II generazione a 4 – loops, da 4250 MW termici (1475 MWe), raffreddato e moderato con acqua leggera;

- L'europeo EPR, cioè un impianto pressurizzato di III+ generazione a 4 – loops, da 4500 MW termici (1630 MWe), raffreddato e moderato con acqua leggera.

Per calcoli incidentali con codici come MELCOR e ASTEC è necessario avere uno schema o modello semplificato dell'edificio di contenimento, cioè una *nodalizzazione* che ne descriva:

- Volumi
- Quote
- Connessioni tra i volumi
- Strutture
- Modalità di eventuali cedimenti
- Ecc.

Nella tabella sottostante vengono riportate le caratteristiche principali del contenimento dei reattori presi come riferimento.

SYSTEMS / PARAMETERS	UNIT	EPR	N4	KONVOI
Net electrical output	*MWe*	*≈1630*	*1475*	*1365*
Thermal power output	*MWth*	*4500*	*4250*	*3850*
Yeld	*%*	*36*	*34.5*	*35.4*
Internal containment		Pre-stressed concrete with a metallic surface	Pre-stressed concrete no surface	Spherical steel enclosure
External enclosure		Reinforced concrete Space between containment walls under negative pressure	Reinforced concrete Space between containment walls under negative pressure	Reinforced concrete Space between containment walls under negative pressure
Pressure control system for serious accident		(sump spray and cooling system) 2x50% lines outside containment for the short term and 2x100% for the long term	Decompression of containment by venting with filtering	Decompression of containment by venting with filtering
Internal volume	m3	≈ 80 000	72 700	70 000
Containment spraying provided in the context of PCC Events		No	2 (100%) lines outside containment	No

9.2 Genericità della nodalizzazione

L'edificio di contenimento è una struttura che consiste in:

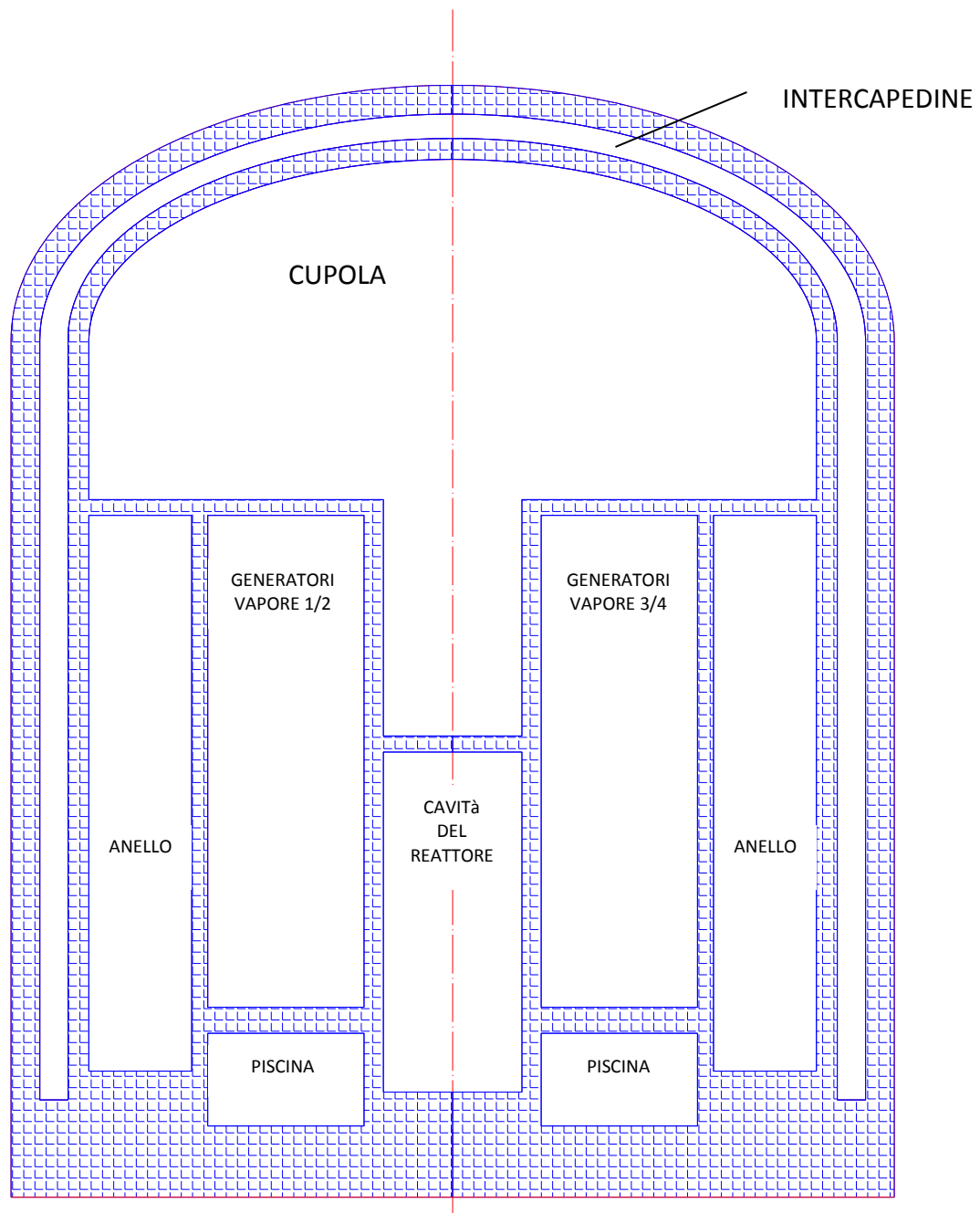
- un edificio di contenimento interno;
- un edificio di contenimento esterno chiamato *Scudo*;
- una intercapedine racchiusa in mezzo ai due edifici interno ed esterno.

L'edificio interno di contenimento è un cilindro con cupola ad arco di cemento armato precompresso a cavi post-tesi, con un rivestimento interno di acciaio.

L'edificio scudo è una struttura in cemento armato con la stessa forma dell'edificio interno. L'edificio scudo confina con un altro edificio che serbe per immagazzinare a titolo provvisorio il combustibile esaurito.

Il contenimento interno resiste a una pressione di *6* bar e ha un volume di 82.000 m3.

9.3 Volumi

Stanze e compartimenti dell'edificio di contenimento sono stati raggruppati tra loro dando origine a 7 volumi + 1 dedicato al "core catcher".

Tutte le strutture e le aperture che collegano i vari volumi tra di loro sono state modellate come "pezzi unici" per motivi di semplicità. I generatori di vapore, per esempio, sono stati modellati uniti due a due.

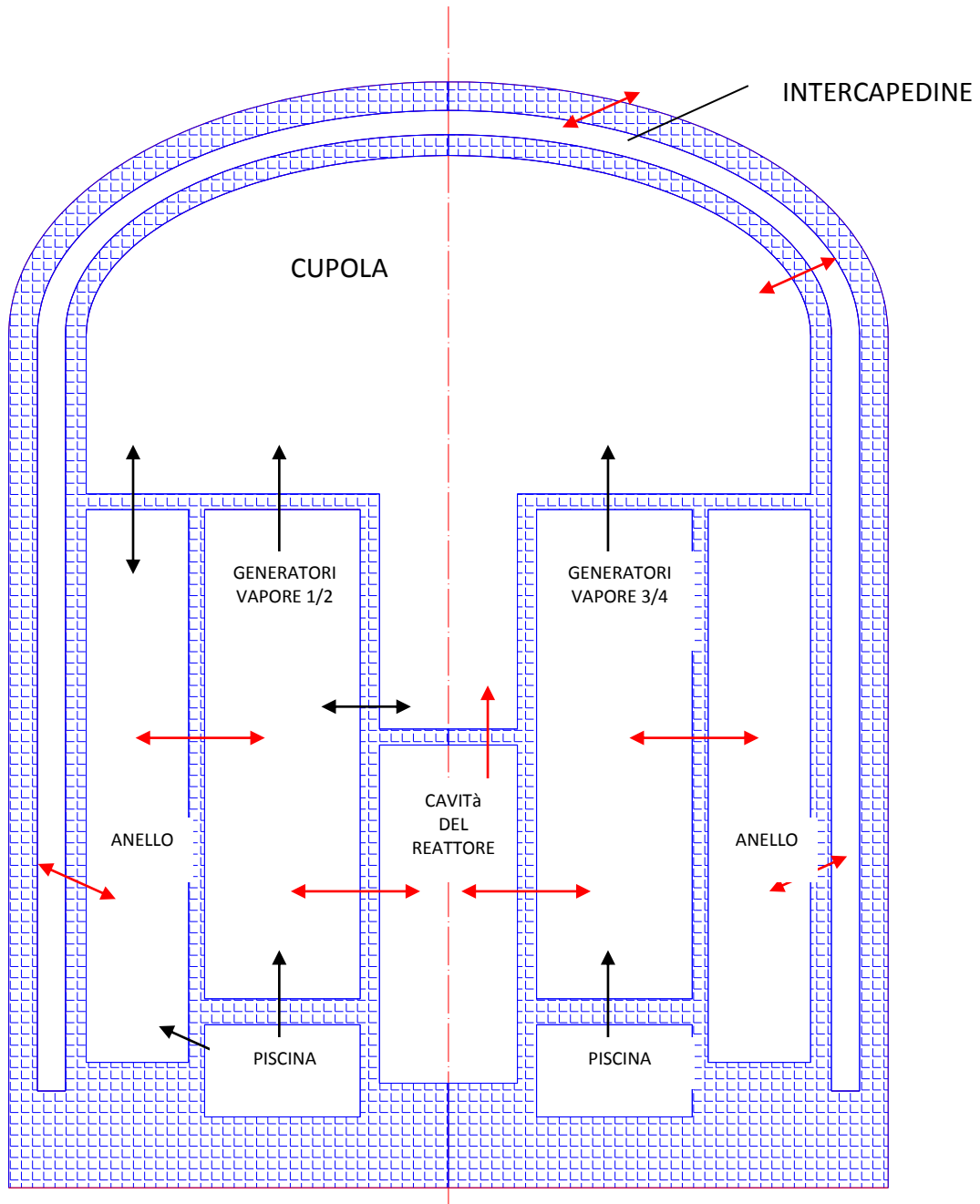
Gli edifici ausiliari per il momento non sono stati presi in considerazione.

Nella Tabella 19 si indicano le caratteristiche principali dei volumi che compongono il contenimento.

Tabella 19: caratteristiche principali dei volumi che compongono il contenimento

Volume	Volume libero [m^3]	Quota base [m]	Altezza [m]
Cupola	900 + 16500 + 11000	29 44 54	15 10 11
Generatore di vapore 1/2	5000	8.0	31.0
Generatore di vapore 3/4	5000	8.0	31.0
Cavità del reattore	600	6.6	21.5
Anello	15000	8.0	35.0
Piscina	3600	4.5	5.8
Intercapedine	14000 + 10000	6.1 54	48.0 14.0

9.4 Connessione tra volumi

I vari volumi di controllo “comunicano” tra di loro mediante connessioni che possono essere sempre attive o che possono essere attivate simulando dei cedimenti strutturali, come per esempio, a causa di sovrapressione.

Le connessioni marcate in colore **nero** si riferiscono a connessioni normalmente “comunicanti”; le connessioni marcate in **rosso** sono normalmente “non comunicanti” e si riferiscono a possibili cedimenti strutturali.

Connessione comunicante	Volume iniziale	Volume finale	Area passaggio [m²]	Elevazione “from” [m]	Elevazione “to” [m]
AN-CUP	ANELLO	CUPOLA	10	38	48
GV12-CUP	GENERATORE DI VAPORE 1/2	CUPOLA	10	38	48
GV34-CUP	GENERATORE DI VAPORE 3/4	CUPOLA	10	38	48
GV12-PIS	GENERATORE DI VAPORE 1/2	PISCINA	10	12	10
GV34-PIS	GENERATORE DI VAPORE 3/4	PISCINA	10	12	10
AN-PIS	ANELLO	PISCINA	100	7.9	7.9
CUP-GV12	CUPOLA	GENERATORE DI VAPORE 1/2	0.1	29	29

Connessione NON comunicante	Volume iniziale	Volume finale	Area passaggio [m²]	Elevazione “from”	Elevazione “to”	ΔP [Pa]
R-CAV-GEN12	CAVITà DEL REATTORE	GENERATORE DI VAPORE 1/2	1	20	20	5000
R-CAV-GEN34	CAVITà DEL REATTORE	GENERATORE DI VAPORE 3/4	1	20	20	5000
R-CAV-CUP	CAVITà DEL REATTORE	CUPOLA	1	27	30	5000
R-GV12-AN	GENERATORE DI VAPORE 1/2	ANELLO	1	30	30	5000
R-GV34-AN	GENERATORE DI VAPORE 3/4	ANELLO	1	30	30	5000
R-AN-INTER	ANELLO	INTERCAPEDIN E	1	30	30	500000
R-CUP-INTER	CUPOLA	INTERCAPEDIN E	1	50	50	500000
R-INTER-AMB	INTERCAPEDIN E	AMBIENTE ESTERNO	1	10	10	50000

9.5 Strutture

Con il termine “strutture” si indicano tutti gli elementi strutturali che compongono l’edificio del reattore, come ad esempio pareti, solai, rivestimenti, eccetera. Nella nodalizzazione si raggruppano vari elementi tra di loro, dando origine a macro-strutture che conservano le capacità termiche (quindi la massa) e le superfici di scambio termico.

I materiali considerati come strutture sono cemento e acciaio le cui proprietà sono definibili dall’utente. Per semplicità vengono suggerite certi valori di riferimento per cemento ed acciaio nella tabella qui di seguito.

	c_p [J/kgK]	λ [W/mK]	ρ [kg/m^3]	ε [-]
Cemento	879	2.1	2225	0.9
Acciaio	480	35	7850	0.9

In molti casi le strutture sono interne a un volume di controllo per cui non scambiano calore con altri volumi, ma costituiscono semplicemente una inerzia termica del sistema.

	Materiale	Area [m^2]	Spessore [m]	Volume adiacente	Volume adiacente	Inclinaz.	Altezza [m]	Lung. [m]	Larg. [m]	Quota [m]
RCAV01	Cemento	450	0.70	Cavità	Cavità	Vert.	14.9	-	15.1	6.6
RCAV02	Cemento	60	1.0	Cavità	Cavità	Oriz.	-	6.0	5.0	6.7
RCAV03	Acciaio	30	0.04	Cavità	Cavità	Vert.	8.5	-	1.8	7.0
PIS01	Cemento	2000	1.0	Piscina	Piscina	Oriz.	-	10	100	4.6
PIS02	Cemento	4200	1.0	Piscina	Piscina	Vert.	1.3	-	1615	4.5
PIS03	Acciaio	4200	0.002	Piscina	Piscina	Vert.	1.3	-	1615	4.5
GV12-01	Acciaio	3000	0.002	GV12	GV12	Vert.	31	-	48	12.0
GV12-02	Cemento	160	0.4	GV12	GV12	Oriz.	16	5	-	12.1
GV12-03	Cemento	3000	0.4	GV12	GV12	Vert.	31	-	48	12.0
GV34-01	Acciaio	3000	0.002	GV34	GV34	Vert.	31	-	48	12.0
GV34-02	Cemento	160	0.4	GV34	GV34	Oriz.	16	5	-	12.1
GV34-03	Cemento	3000	0.4	GV34	GV34	Vert.	31	-	48	12.0
CUP01	Cemento	2160	0.3	Cupola	Cupola	Oriz.	-	54	20	44.0
CUP02	Cemento	5200	0.3	Cupola	Cupola	Vert.	36	-	72	29.0
CUP03	Acciaio	3900	0.01	Cupola	Cupola	Vert.	36	-	54	29
AN01	Cemento	10000	0.3	Anello	Anello	Vert.	27	-	185	8.0
AN02	Cemento	2000	0.3	Anello	Anello	Oriz.	-	8	125	8.0
AN03	Acciaio	3400	0.01	Anello	Anello	Vert.	27	-	63	8.0
INT-AMB	Cemento	14000	1.8	Interc.	Ambiente	Vert.	50	-	140	6.1
AN-INT	Acciaio Cemento	3500	0.03 1.2	Anello	Intercap.	Vert.	35	-	50	7.9
CUP-INT	Acciaio Cemento	5500	0.03 1.2	Cupola	Intercap.	Vert.	35	-	140	29.0

10 Ricombinatori Autocatalitici passivi (PAR)

Durante l'avvenimento di incidenti severi in un impianto nucleare è possibile che varie reazioni chimiche portino alla produzione di ingenti quantità di gas Idrogeno. L' Idrogeno in un ampio intervallo di concentrazioni volumetriche con l'ossigeno atmosferico può provocare violente esplosioni che possono danneggiare il contenimento esterno dei reattori, facendo venire a mancare una delle barriere fondamentali nell'architettura gerarchica del concetto di "difesa in profondità" sviluppato nella sicurezza nucleare.

La prevenzione di questo evento accidentale è basata su diversi principi tutti completamente passivi, ovvero in grado di agire anche in totale assenza di energia esterna e della azione di un qualunque operatore.

Il primo fondamentale principio di sicurezza si fonda sulla diluizione di un qualunque rilascio gassoso all'interno dell'intero edificio contenitore.

Tale diluizione avviene separandio i diversi volumi dell'edificio con membrane a rottura. Un differenziale di pressione fra una faccia e l'altra delle membrane maggiore di 7 kPa è in grado di assicurare la rottura della membrana e la diffusione dei gas da un settore all'altro dell'edificio.

Il volume totale dell'edificio è tale che anche nelle peggiori condizioni ipotizzabili la percentuale di gas combustibile rimane a livelli tali da mitigare il rischio esplosione.

Una seconda e più efficace difesa, anch'essa assolutamente passiva, consiste nell'utilizzo dei ricombinatori catalici.

In caso di incidente le molecole di idrogeno, venendo in contatto con la superficie del catalizzatore reagiscono accoppiandosi con l'ossigeno dell'aria. Tale reazione, essendo esoenergetica non ha bisogno di alcuna fonte di energia esterna per alimentarsi, né di alcuna manovra per essere attivata.

I naturali moti convettivi, che vengono ad instaurarsi, anche a causa del calore rilasciato dalla reazione, sono in grado di assicurare un efficiente rimescolamento dei gas presenti. E' sufficiente una concentrazione di idrogeno pari a circa 1-2% per far partire il processo di conversione. Rimuovendo in tal modo il gas combustibile si preservano le strutture idonee al contenimento dei materiali radioattivi che rimangono efficacemente confinati.

Il sistema di protezione di base Consta di :

1) due diversi modelli di PAR (Passive Autocatalytic Recombiners), volti ad eliminare l'idrogeno in eccesso, che differiscono tra loro per dimensioni e naturalmente relativo valore nominale di conversione;
2) diaframmi a rottura per piccoli valori di pressione differenziale, per assicurare sia la diluizione dei gas;
3) diaframmi a rottura per pressione differenziale o temperatura differenziale per la omogeneizzazione dei gas mediante moti convettivi all'interno dell'edificio;
4) un sistema di controllo per la misura della concentrazione di idrogeno.
5) valvole miscelatrici di idrogeno (Hydrogen mixing damper) che mettono in comunicazione (vedi figura) il serbatoio interno per la riserva di acqua con i compartimenti anulari all'interno del contenimento aprendosi al verificarsi di una delle seguenti condizioni:

- in base ad un minimo (3.45 10^3 Pa) differenziale di pressione (funzionamento passivo);
- in base ad un aumento assoluto di pressione;
- mancanza di alimentazione (grazie a molle precaricate)
- per manovra manuale dell'operatore

I sensori per la rilevazione della pressione sono due per ogni treno di generatori di vapore, quindi 8 in totale, quelli per la misura assoluta sono uno per ogni treno.

La rilevazione di un differenziale di pressione anomalo per almeno due diversi sensori di pressione provoca la apertura di tutti i dampers.

La apertura di queste valvole permette l'instaurarsi di un efficace moto convettivo in presenza di vapore acqueo che permette la omogenizzazione di eventuali gas su tutto il volume dell'edificio.

Di seguito vengono riportate le caratteristiche dei sistemi su elencati

Large PARs
- Numero di unità 41
- Valore nominale di riduzione di Idrogeno (per PAR) 1.5 10^{-3} Kg/s
- Substrato catalitico Pt / Pd

Small PARs
- Numero di unità 6
- Valore nominale di riduzione di Idrogeno (per PAR) 3.3 10^{-4} Kg/s
- Substrato catalitico Pt / Pd

Hydrogen mixing dampers
- Numero di unità 8
- Dimensioni dell'apertura (totale) 6 104 cm^2
- Differenza di pressione nominale di apertura 3.45 103 Pa; pressione assoluta di apertura 1.2 105 Pa

Rupture foils
- Dimensioni dell'apertura (totale) 3.5 105 cm2
- Pressione differenziale nominale di apertura 4.9 103 Pa

Convection foils
- Approximate opening cross section (total) 4.5 6 105 cm2
- Pressione differenziale nominale di apertura 4.9 103 Pa
- Temperatura nominale di apertura 82.5°C

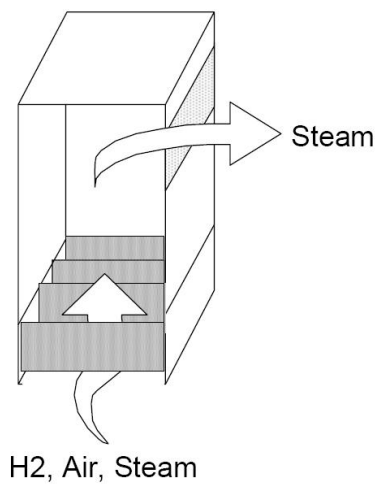
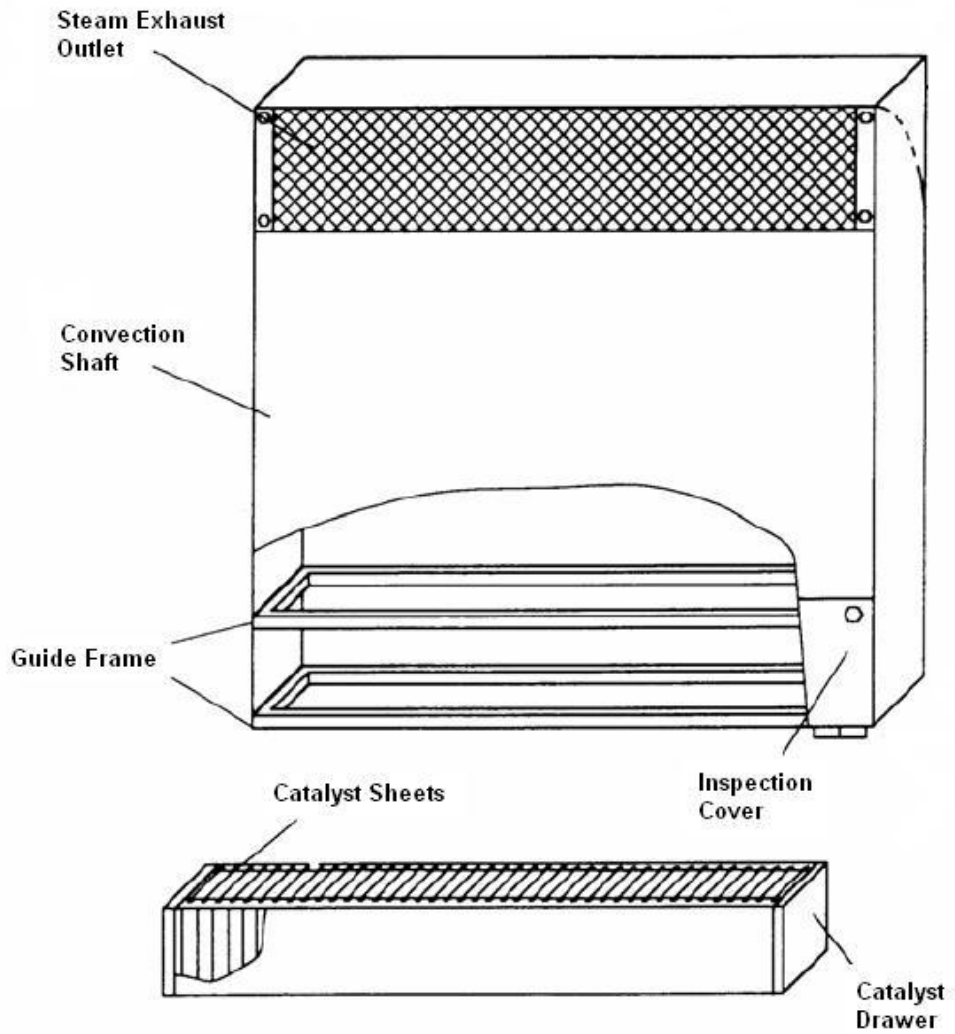



Figura 14: Schema di massima di un generico PAR

Figura 15: Saracinesche per la circolazione dei gas verso la riserva di acqua (vedi Figura 17). Normalmente aperte

Figura 16: Aperture comandate per instaurare la naturale convezione all’interno dell’edificio reattore

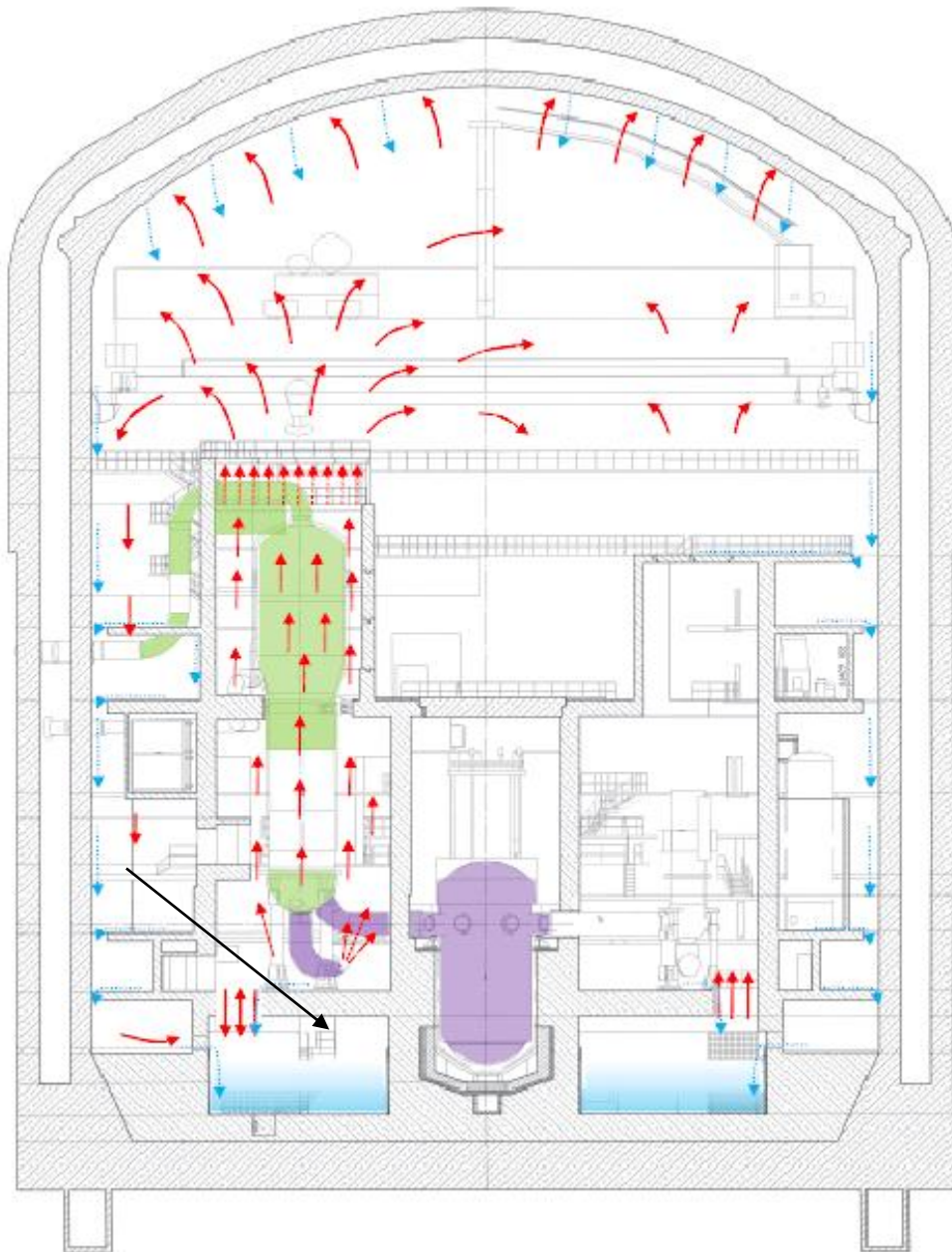



Figura 17: Schema generale di circolazione

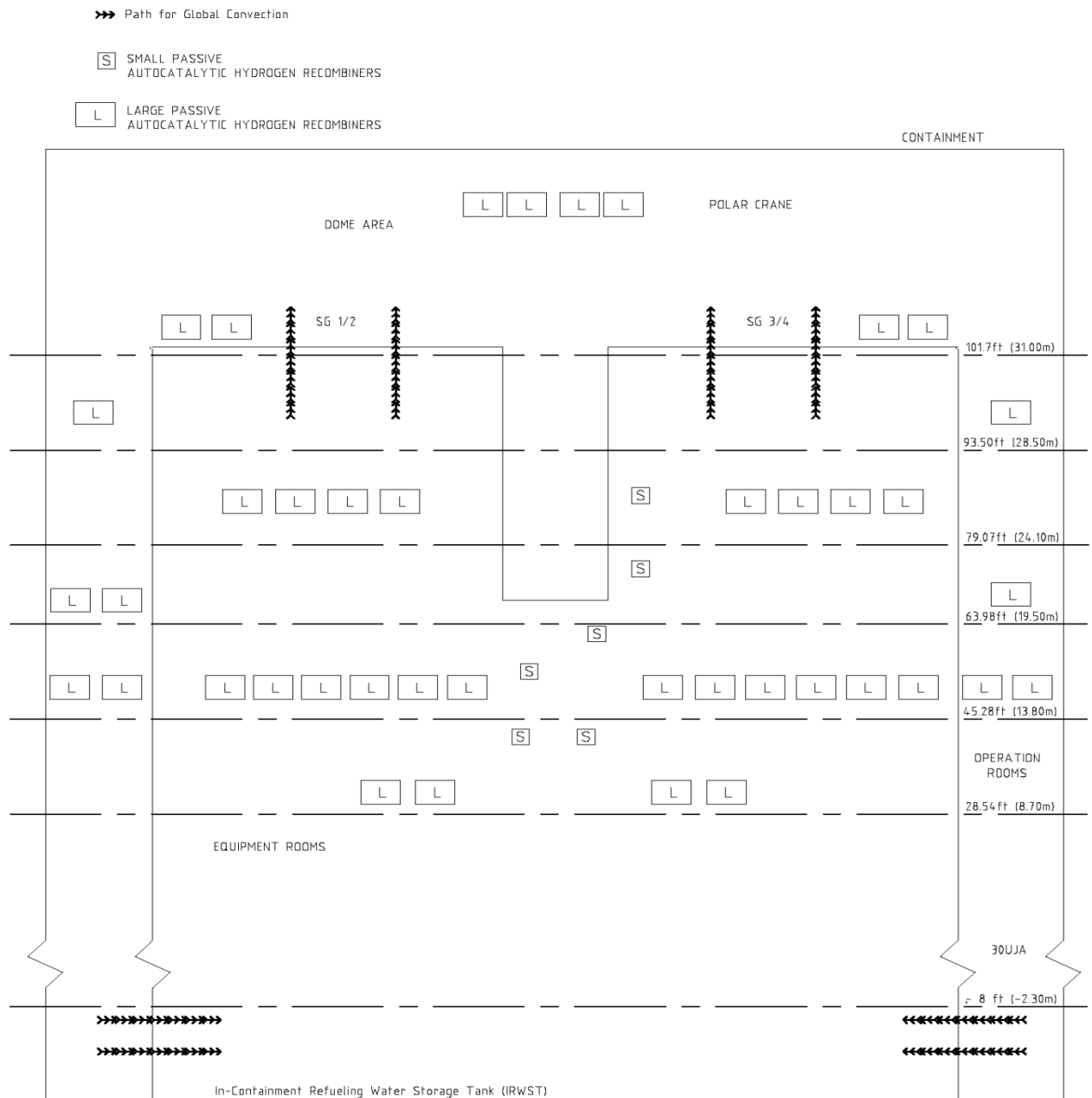



Figura 18: Posizionamento dei large (L) e dei small (s) PARs all'interno dell'edificio reattore e vista di massima delle aperture in condizione incidentale

10.1 Commenti

Ciò che in linea di principio si vorrebbe riuscire a raggiungere è un sistema che in assenza di PAR, ma esclusivamente in base a caratteristiche geometriche dell'impianto (volume e sezione dei setti a rottura) raggiunga una concentrazione di Idrogeno pari al 4% in volume in caso di DBA e del 10% in caso di SA (fusione completa delle barre di combustibile posizionate all'interno del vessel, ma non delle barre di combustibile esaurito posizionate nella piscina).

In realtà sembra difficile assicurare questo risultato e certamente sarà necessario approfondire la conoscenza delle dinamiche incidentali, soprattutto alla luce dei recenti accadimenti.

Da prime stime indipendenti sembrerebbe che in realtà questi risultati siano a malapena raggiungibili considerando tutti i PAR funzionanti con una efficienza del 100%

11 Sistemi di controllo e di automazione

Responsabile del Capitolo	GRNSPG
Organizzazioni contribuenti	

11.1 Descrizione funzionale delle funzioni dello spegnimento del reattore

Le variabili monitorate dal sistema di protezione sono usate direttamente o come input di un calcolo, al fine di rilevare le condizioni dell'impianto per avviare l'arresto del reattore:

- *Basso DNBR.*
- *Alta densità di potenza lineare.*
- *Rapida variazione del flusso neutronico*
- *Alto livello di potenza del nocciolo.*
- *Basso margine di saturazione.*
- *Bassa portata del refrigerante nel circuito del reattore (due circuiti).*
- *Bassa portata del refrigerante nel circuito del reattore (un circuito).*
- *Bassa velocità della pompa del refrigerante.*
- *Alto flusso neutronico.*
- *Basso tempo di raddoppio.*
- *Bassa pressione nel pressurizzatore.*
- *Alta pressione nel pressurizzatore.*
- *Alto livello nel pressurizzatore.*
- *Bassa pressione nel ramo caldo.*
- *Caduta di pressione nel generatore di vapore.*
- *Bassa pressione nel generatore di vapore.*
- *Alta pressione nel generatore di vapore.*
- *Basso livello nel generatore di vapore.*
- *Alto livello nel generatore di vapore.*
- *Alta pressione nel contenimento.*

Ciascuna di queste condizioni è determinata da uno specifico setpoint pre-definito o variabile. I valori di setpoint specifici sono scelti per rispettare i limiti di sicurezza e per poter supportare le assunzioni formulate nell'analisi di sicurezza dell'impianto.

In aggiunta alle condizioni di processo che causano lo spegnimento del reattore, anche questi segnali relativi alla sicurezza comprtano lo spegnimento:

- Attuazione del sistema di iniezione di sicurezza.
- Attuazione del sistema dell'acqua di alimento di emergenza.
- Segnale di spegnimento manuale del reattore dal sistema di informazioni di sicurezza e controllo.

Protective Function	Variables To Be Monitored	Range of Variables
High Linear Power Density	Neutron Flux-Self Powered Neutron Detectors	0–590 W/cm
Low DNBR	Neutron Flux-Self Powered Neutron Detectors	0–590 W/cm
	Cold Leg Temperature (NR)	500°F–626°F
	RCP Speed	500 -1300 rpm
	RCCA position	0–100% Insertion
	Pressurizer Pressure	1615-2515 psia
High Neutron Flux Rate of Change	Neutron Flux-Power Range Detectors	0.5–200% NP
High Core Power Level	Cold Leg Temperature (WR)	32°F - 662°F
	Hot Leg Pressure (WR)	15–3015 psia
	Hot Leg Temperature (NR)	536°F -662°F
Low Reactor Coolant Pump Speed	RCP Speed	500 -1300 rpm
Low Loop Flow Rate (two loops)	RCS Loop Flow	0–120% NF
Low-Low Loop Flow Rate (one loop)	RCS Loop Flow	0–120% NF
Low Doubling Time	Neutron Flux-Intermediate Range Detector	5 x 10E-6–60% NP
High Neutron Flux	Neutron Flux-Intermediate Range Detector	5 x 10E-6–60% NP
Low Pressurizer Pressure	Pressurizer Pressure (NR)	1615–2515 psia
High PZR Pressure	Pressurizer Pressure (NR)	1615–2515 psia
High PZR Level	Pressurizer Level	0-100% MR
Low Hot Leg Pressure	Hot Leg Pressure (WR)	15–3015 psia
Steam Generator Pressure Drop	SG Pressure	15–1615 psia
Low Steam Generator Pressure	SG Pressure	15–1615 psia
High Steam Generator Pressure	SG Pressure	15–1615 psia
Low Steam Generator Level	SG Level (NR)	0-100% MR
High Steam Generator Level	SG Level (NR)	0-100% MR
High Containment Pressure	Containment Service Compartment Pressure (NR)	-3 psig to +7 psig
	Containment Equipment Compartment Pressure	-3 psig to +7 psig
Low Saturation Margin	Cold Leg Temperature (WR)	32°F - 662°F
	Hot Leg Pressure (WR)	15–3015 psia
	Hot Leg Temperature (NR)	536°F–662°F

Fig. 1 – Variabili per la determinazione dello spegnimento del reattore.

11.1.1 Spegnimento del reattore per Basso DNBR

Per proteggere il combustibile da danni derivanti da una refirigerazione non efficiente è previsto lo spegnimento del reattore per Basso DNBR. La stima di questa quantità è ottenuta valutando in tempo reale:

- La distribuzione della densità di potenza nel canale caldo.
- La temperatura in ingresso.
- La pressione.

- La portata nel nocciolo.

Devono essere calcolati molti valori sia per il DNBR che per il titolo in uscita, che vengono confrontati con valori di set-point fissi o variabili al fine di individuare se sussitono le condizioni per lo spegnimento del reattore. Le verifiche considerate riguardano:

- Il secondo valore più basso del DNBR rispetto a un valore di set-point variabile.
- Il valore del DNBR rispetto a un valore di set-point variabile, valido nel caso di caduta di una barra di controllo in uno dei quattro settori in cui si suddivide il nocciolo o si abbia il segnale di distribuzione non simmetrica di potenza nel nocciolo.
- Il valore del DNBR rispetto a un set-point variabile valido nel caso in cui si abbia la caduta di una barra di controllo in almeno due settori in cui si suddivide il noccolo.
- Il valore più alto del titolo rispetto ad un set-point fisso.
- Il valore più alto del titolo rispetto ad un set-point fisso valido nel caso di caduta di una barra di controllo in uno dei quattro settori in cui si suddivide il noccolo o si abbia il segnale di distribuzione non simmetrica di potenza nel nocciolo.

Un esempio di generazione del segnale di caduta delle barre di controllo è riportato in Fig. 2. Per adeguare i set-points, il sistema primario rileva la caduta delle barre di controllo in uno o più settori misurando la velocità di spostamento di queste nei vari settori del noccolo e la distribuzione di potenza nel nocciolo attraverso i segnali derivanti dai vari rilevatori di neutroni (SPND) per ognuno dei sottosistemi del sistema primario. Per bassi livelli di potenza, questa funzione è disattivata.

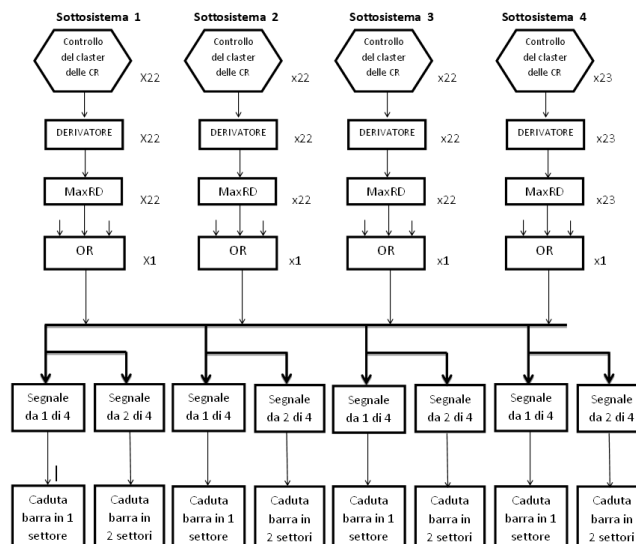



Fig. 2 – Esempio di rilevazione di caduta di una barra di controllo.

11.1.2 Spegnimento del reattore per Alta Densità di Potenza Lineare

Per impedire la fusione del combustibile al centro della pastiglia è previsto lo spegnimento del reattore per Alta Densità di Potenza Lineare. Si calcolano tutti i valori didisponibili del rilevatore di alta potenza lineare utilizzando i dati dei vari rilevatori di neutroni (SPND). Il maggiore di questi è confrontato con un valore di set-point variabile per verificare se sussitono

le condizioni per lo spegnimento del reattore. Per livelli di potenza inferiore ad un setpoint fissato, questa funzione è disattivata.

11.1.3 Spegnimento del reattore per rapida variazione del Flusso Neutronico

Per proteggere il reattore da eccessivi aumenti di reattività è previsto lo spegnimento qualora si rilevi un rateo di variazione del flusso neutronico troppo elevato. Nello specifico, l'obiettivo principale è evitare che possano avvenire eventi come l'espulzione di una barra di controllo. Questa funzione è sempre attiva.

Questa funzione è governata da un segnale di tipo derivativo, come si può vedere schematicamente in Fig. 3, ottenuto dalle misure di flusso neutronico effettuate dai rilevatori di flusso neutronico per il campo di potenza. Ogni sottosistema del sistema di protezione confronta il segnale generato con un set-point fisso. Tale segnale è ottenuto grazie alle quattro coppie di misure che i rilevatori di flusso neutronico per il campo di potenza rilevano nella metà superiore e inferiore in ognuno dei quattro settori del nocciolo.

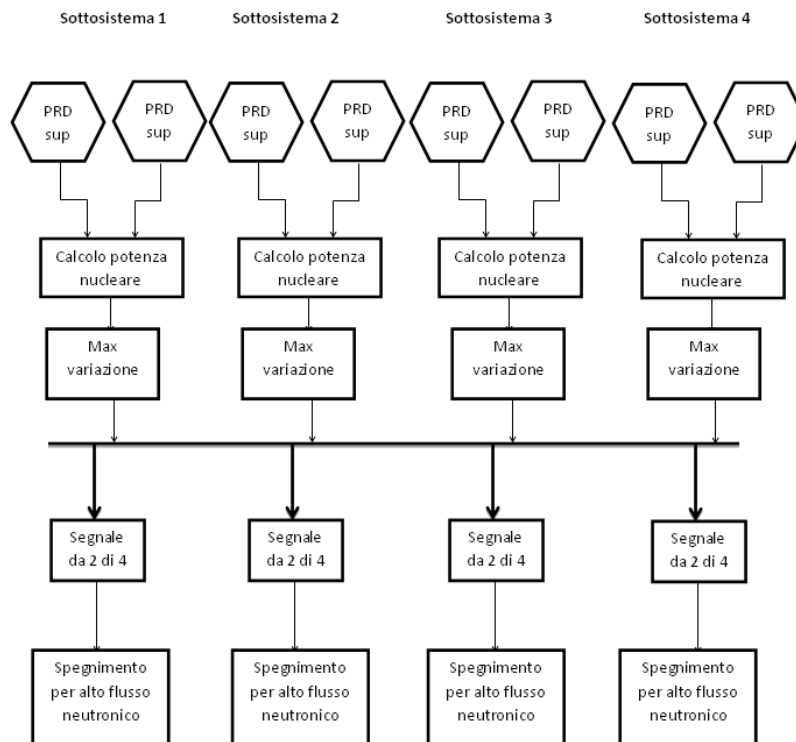



Fig. 3 – Esempio di funzione di spegnimento per alto flusso neutronico.

11.1.4 Spegnimento del reattore per Alto Livello di Potenza nel Nocciolo o Basso Margine di Saturazione

Per la protezione contro inserzioni eccessive di reattività durante il funzionamento a potenza intermedia o alta è previsto lo spegnimento del reattore per Elevato Livello di Potenza nel Nocciolo. La potenza termica generata nel nocciolo è valutata tramite i consueti bilanci di massa ed energia. Il valore ottenuto è confrontato con un set-point fisso per valutare se sussistono le condizioni di spegnimento. Al fine di impostare il bilancio si valutano le entalpie

attraverso la temperatua del ramo freddo e la temperatura e la pressione del ramo caldo. Il flusso di massa attraverso il core è valutato moltiplicando la portata volumetrica nominale per la densità ricavata dalle misure di entalpia e pressione. Qualora il sistema di protezione rilevi bassa portata in un circuito di refrigerazione, la portata volumetrica è valutata considerando tre soli circuiti del sistema stesso.

Nel caso in cui si giunga in condizioni di saturazione nel ramo caldo il calcolo del livello di potenza nel nocciolo non è più idoneo, è previsto quindi lo spegnimento nel caso in cui il valore del margine di saturazione scende sotto un set-point fisso. Il margine di saturazione è determinato ricavando il valore dell'entalpia di saturazione in funzione della pressione nel ramo caldo e l'entalpia specifica all'uscita del nocciolo in funzione della temperatura rilevata. Per livelli di potenza inferiore ad un setpoint fissato, questa funzione è disattivata. Fig. 4 riporta un esempio di funzionamento.

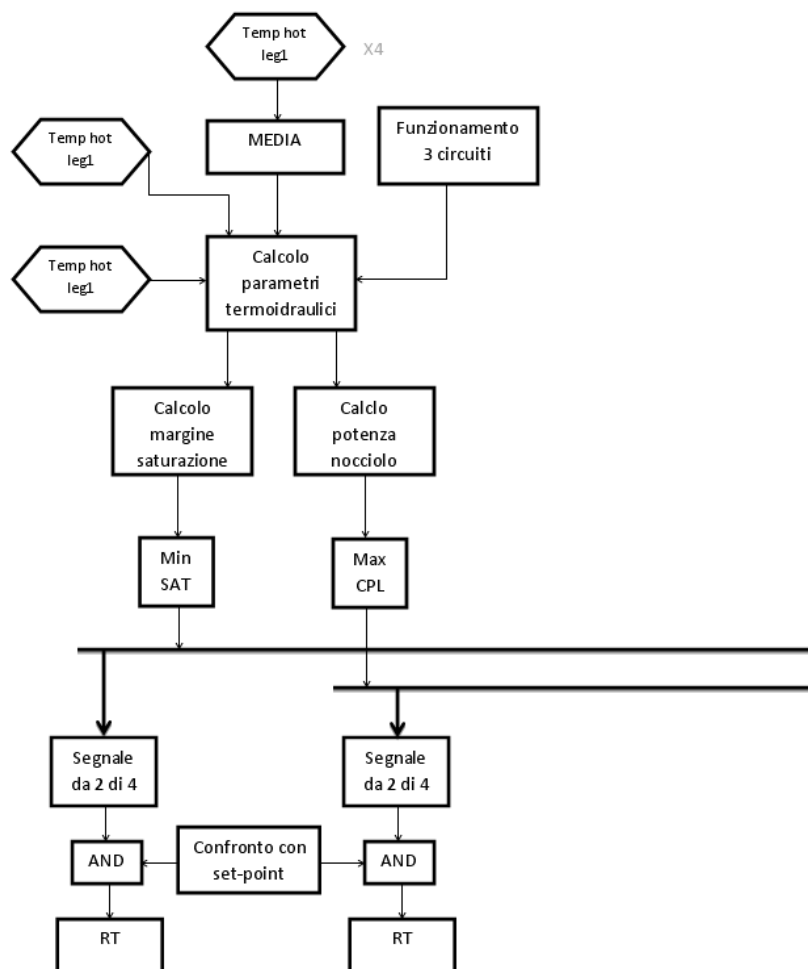



Fig. 4 – Esempio di funzione di spegnimento per.alto livello di potenza e basso margine di saturazione

11.1.5 Spegnimento del reattore per Bassa Portata del Sistema di Refrigerazione del Nocciolo – Due circuiti

Nel caso di Bassa Portata nel sistema di refrigerazione è previsto lo spegnimento del reattore al fine di garantire una rimozione del calore adeguata e un corretto valore del DNBR. In ogni

circuito del refrigerante vengono eseguite quattro misure di portata, ognuna delle quali è inviata a un sottosistema del sistema di protezione dove viene confrontata con un un set-point di limite inferiore (Min1P) fisso. Nel caso in cui risultino veri almeno due segnali su quattro si assume che ci sia bassa portata nel circuito. Si avrà spegnimento sicuro qualora questa condizione sia rilevata in almeno due circuiti.

Se la condizione di bassa portata è rilevata in un solo circuito, viene generato un segnale che informa le altre funzioni del sistema di protezione, che per il loro funzionamento assumono come valore di portata attraverso il core quella nominale, di considerare il valore di tale portata come se si avessero tre soli circuiti funzionanti. Per livelli di potenza inferiore ad un set-point fissato, questa funzione è disattivata. Fig. 5 riporta uno schema semplificato del sistema.

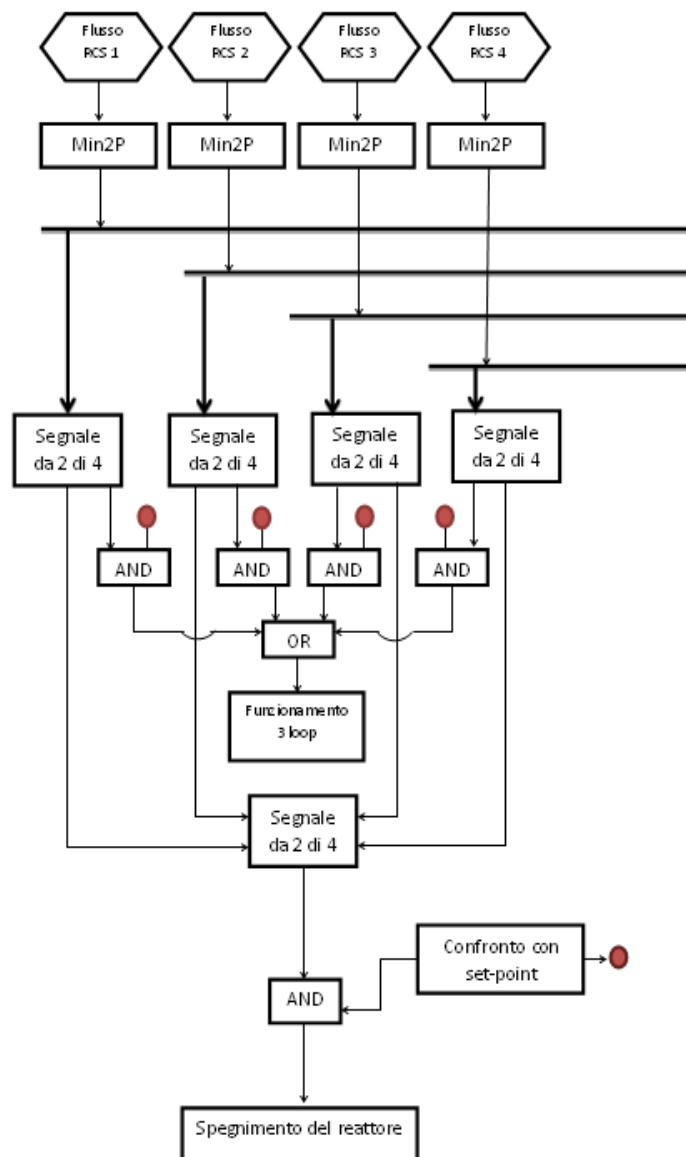



Fig. 5 – Esempio di funzione di spegnimento per per bassa protata nel sistema di refrigerazione.

11.1.6 Spegnimento del reattore per portata molto bassa – Un circuito

Nel caso di Portata Molto Bassa nel sismta di refrigerazione è previsto lo spegnimento sicuro al fine di garantire una rimozione del calore adeguata e un corretto valore del DNBR. Le misure di portata che giungono al sistema di protezione sono confrontate con un set-point di limite inferiore (Min2P) fisso. Nel caso in cui si abbiano almeno due segnali positivi viene avviato lo spegnimento del reattore. Per livelli di potenza inferiore ad un set-point fissato, questa funzione è disattivata. Fig. 6 riporta uno schema semplificato del sistema.

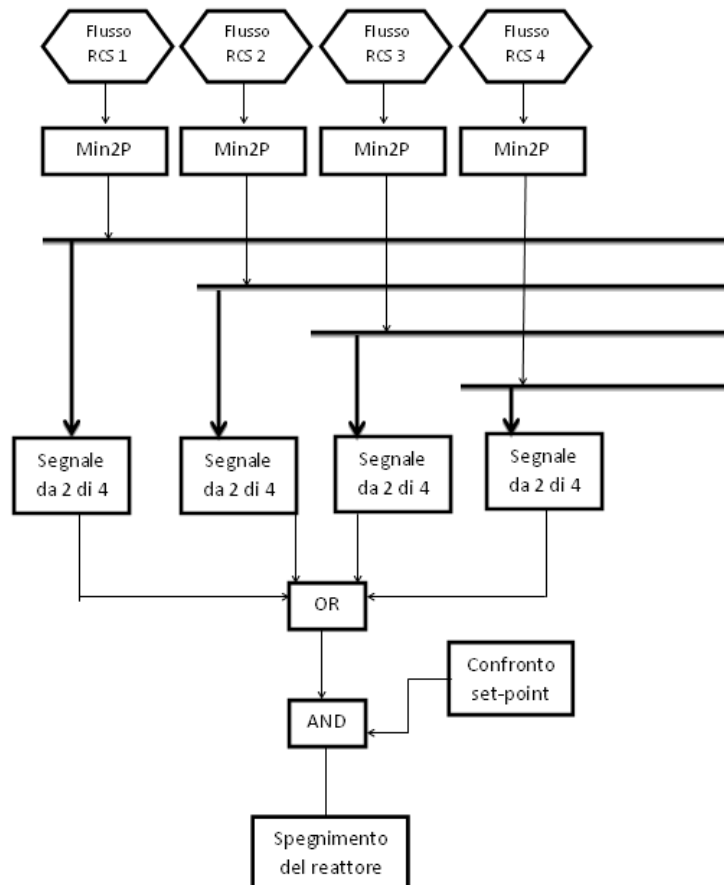



Fig. 6 – Esempio di funzione di spegnimento per bassa protata nel sistema di refrigerazione.

11.1.7 Spegnimento del reattore per Bassa Velocità della Pompa del Refrigerante

Nel caso in cui un problema di alimentazione elettrica alle pompe pregiudichi il loro corretto funzionamento, è previsto lo spegnimento del reattore per scongiurare la perdita di flusso di refrigerante attraverso il nocciolo. Il valore della velocità di tutte le pompe viene misurato e confrontato con un valore di set-point . Qualora risulti inferiore ad un certo livello, viene spento il reattore. Per livelli di potenza inferiore ad un set-point fissato, questa funzione è disattivata. Fig. 7 riporta uno schema semplificato del sistema.

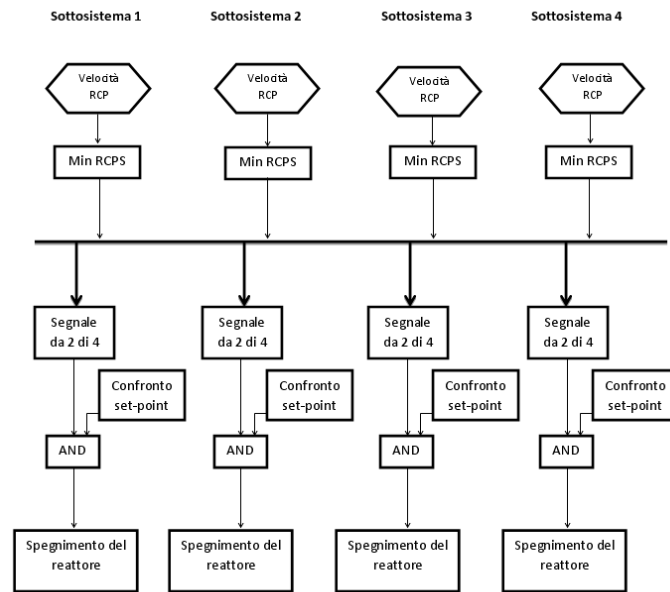



Fig. 7 – Esempio di funzione di spegnimento per bassa velocità della pompa del refrigerante.

11.1.8 Spegnimento del reattore per Alto Flusso Neutronico

Questa funzione protegge dal'eccessiva inserzione di reattività durante l'avviamento del rattore da una condizione di sottocriticità o di bassa potenza. L'intervento dello spegnimento del reattore in questo caso è comandato grazie alla misura del flusso neutronico da parte dei rivelatori neutronici a media potenza. Il valore delle misure effettuate dai rilevatori neutronici a media potenza sono inviate ai sottositemi del sistema di protezione che li elaborano e li confrontano con un set-point fisso. Qualora due delle quattro misure eccedano il valore del set-point viene avviato lo spegnimento del reattore. Per livelli di potenza inferiore ad un set-point fissato, questa funzione è disattivata. Fig. 8 riporta uno schema semplificato del sistema.

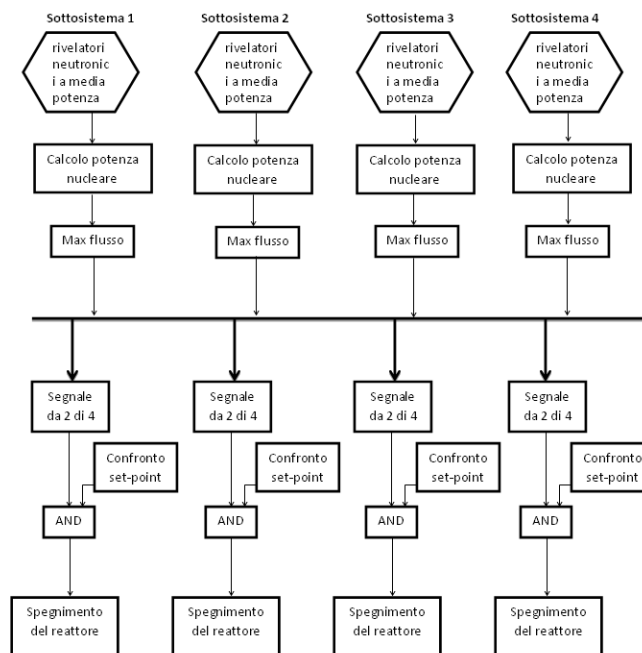



Fig. 8 – Esempio di funzione di spegnimento per alto flusso neutronico.

11.1.9 *Spegnimento del reattore per Basso Tempo di Raddoppio*

Per la protezione contro l'eccessiva inserzione di reattività durante l'avviamento del rattore da una condizione di sottocriticità o di bassa potenza è previsto lo spegnimento del reattore nel caso in cui si rilevino tempi di raddoppio troppo bassi. Ogni sottosistema del sistema di sicurezza elabora il valore della misura di uno degi rivelatori a potenza intermedia e determina un valore del tempo di raddoppio da confrontare con un set-point. Qualora almeno due confronti rilevino un tempo di raddoppio inferiore alla soglia viene effettuato lo spegnimento del reattore. Per livelli di potenza inferiore ad un set-point fissato, questa funzione è disattivata. Fig. 9 riporta uno schema semplificato del sistema.

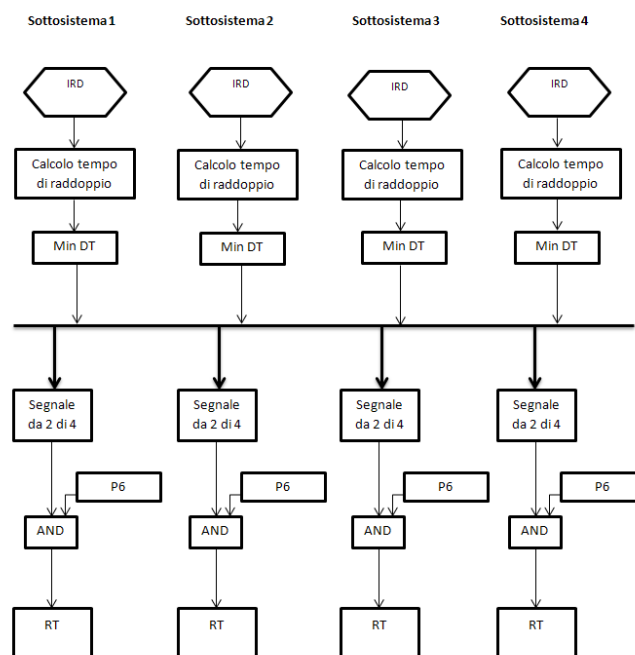



Fig. 9 – Basso tempo di raddoppio.

11.1.10 *Spegnimento del reattore per bassa pressione nel pressurizzatore*

Per scongiurare un' eccessiva ebollizione nel nocciolo, con formazione di vapore saturo tale da compromettere l'integrità del combustibile è previsto lo spegnimento del reattore. Lo spegnimento è comandato nel caso in cui si osservi che almeno due misure delle quattro inviate ad ogni sottosistema del sistema di protezione sia inferiore ad un valore di set-point fisso (Min2p). Per livelli di potenza inferiore ad un set-point fissato, questa funzione è disattivata. Fig. 10 e Fig. 11 riportano uno schema semplificato del sistema.

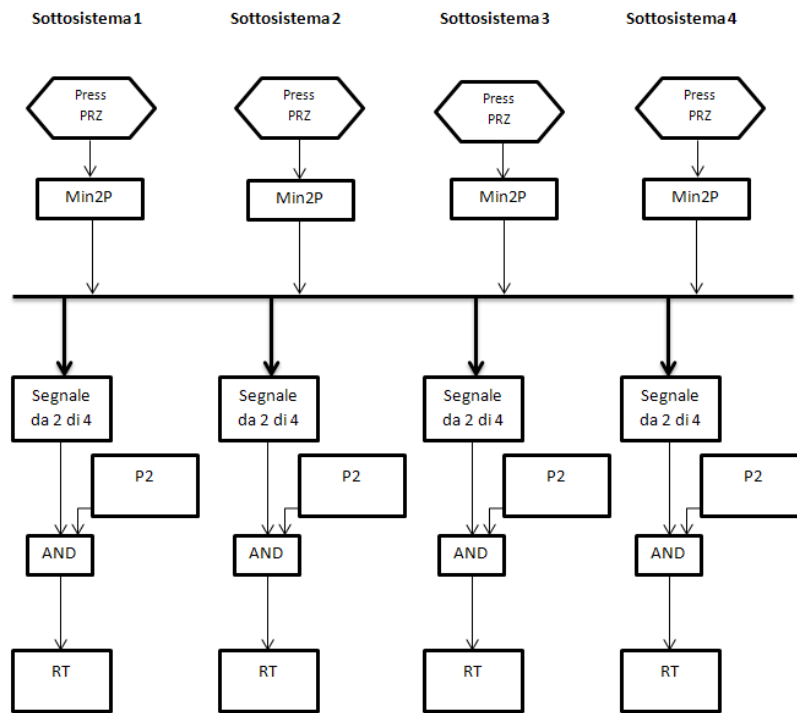



Fig. 10 – Alta pressione nel pressurizzatore.

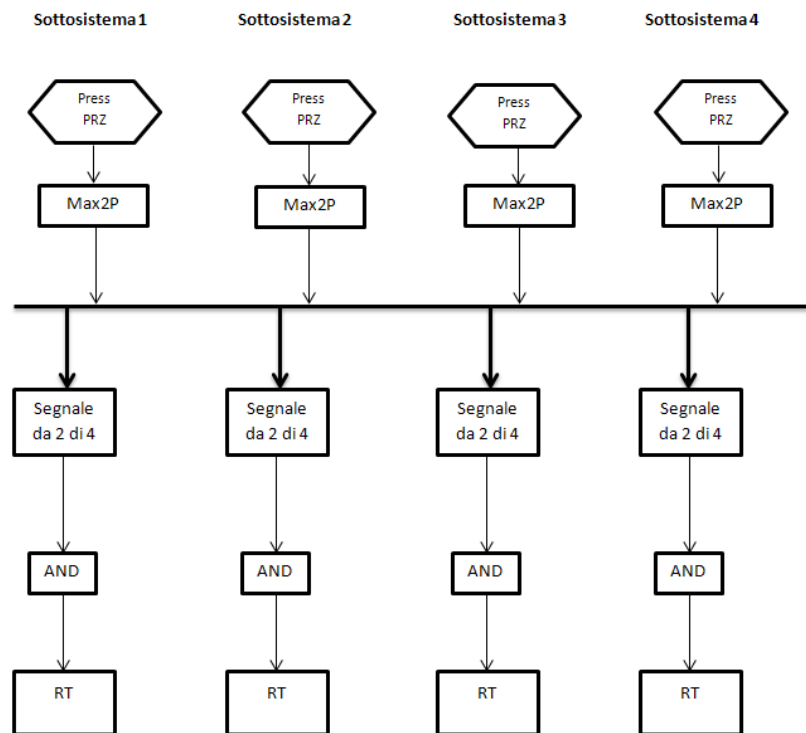



Fig. 11 – Bassa pressione nel pressurizzatore.

11.1.11 Spegnimento del reattore per alta pressione nel pressurizzatore

E' previsto lo spegnimento del reattore nel caso in cui si rilevi una pressione troppo alta nel pressurizzatore per salvaguardare l'integrità del circuito primario e prevenire l'apertura della valvola di sicurezza del pressurizzatore. Quattro sensori misurano la pressione che viene confrontata dal sistema di protezione con un valore si set-point fisso (Max2p). Viene comandato lo spegnimento se almeno due valori eccedono il set-point. Questa funzione è sempre attiva. Fig. 10 e Fig. 11 riportano anche uno schema semplificato di questo sistema.

11.1.12 Spegnimento del reattore per alto livello nel pressurizzatore.

Per impedire un eccessivo riempimento del pressurizzatore è previsto lo spegnimento del reattore. Ogni sottosistestema del sistema di protezione compara con un valore di set-point fisso (max1p) il risultato della misura di livello effettuata da uno dai quattro sensori disponibili. Se almeno due valori eccedono tale set-point viene comandato lo spegnimento. Per livelli di potenza inferiore ad un set-point fissato, questa funzione è disattivata. Fig. 12riporta uno schema semplificato del sistema.

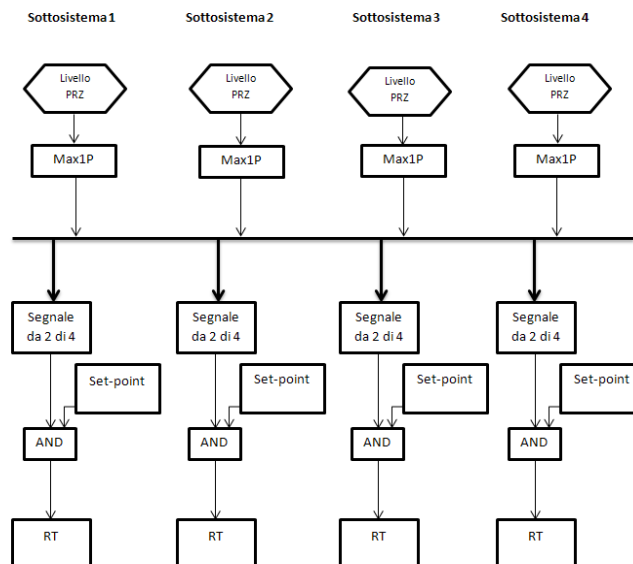



Fig. 12 – Alto livello nel pressurizzatore.

11.1.13 Spegnimento del reattore per bassa pressione nel ramo caldo

Per scongiurare un' eccessiva ebollizione nel nocciolo con formazione di vapore saturo tale da compromettere l'integrità del combustibile è previsto lo spegnimento del reattore. Ogni sottositema del sistema di protezione confronta con un valore di set-point fisso (Min1p) il valore della misura di pressione che riceve da uno dei quattro sensori previsti in ogni ramo caldo. Se almeno due valori sono inferiori a tale set-point viene comandato lo spegnimento. Per livelli di potenza inferiore ad un set-point fissato, questa funzione è disattivata. Fig. 13 riporta uno schema semplificato del sistema.

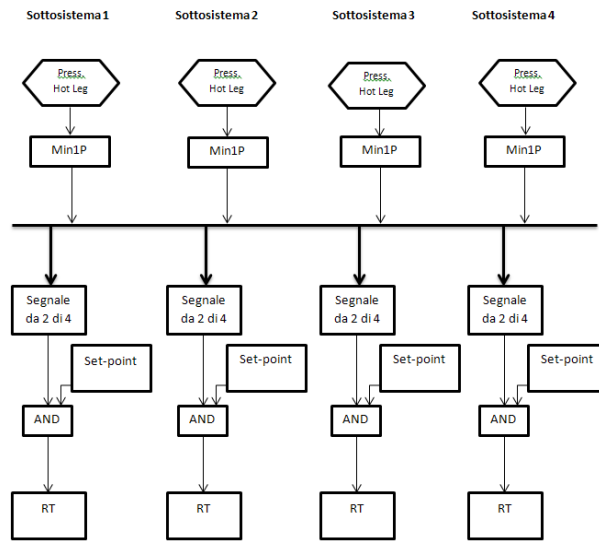



Fig. 13 – Alta pressione nel ramo caldo.

11.1.14 Spegnimento del reattore per caduta di pressione nel GV

Qualora la pressione nel generatore di vapore diminuisca a seguito di un aumento della richiesta di vapore è previsto lo spegnimento del reattore per impedire il danneggiamento del combustibile a seguito dell'inserzione di reattività dovuta alla diminuzione di temperatura del moderatore. Ogni sottosistema del sistema di protezione confronta il risultato della misura di uno dei quattro sensori di pressione previsti in ogni generatore di vapore e lo confronta con un valore si set-point variabile. Lo spegnimento è comandato se per almeno un generatore di vapore due o più valori sono inferiori al set-point. Il set-point variabile è determinato sottraendo al valore misurato della pressione una quantità fissa, assumendo una limitazione per il rateo di diminuzione del valore di set-point. Si avrà che il valore della pressione misurata sarà inferiore a quello del set-point solo se la diminuzione avverrà con una velocità superiore al limite per il rateo di diminuzione per un dato tempo. Questa funzione è sempre attiva. Fig. 14 riporta uno schema semplificato del sistema.

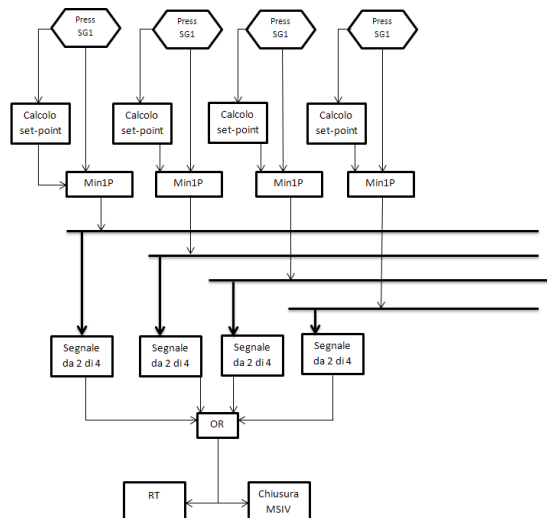



Fig. 14 – Caduta di pressione nel generatore di vapore.

11.1.15 *Spegnimento del reattore per bassa pressione nel generatore di vapore*

Qualora la pressione nel generatore di vapore diminuisca a seguito di un aumento della richiesta di vapore è previsto lo spegnimento del reattore per impedire il danneggiamento del combustibile a seguito dell'inserzione di reattività dovuta alla diminuzione di temperatura del moderatore.
Il sistema precedentemente illustrato non è in grado di comandare lo spegnimento se si verifica una piccola rottura nel circuito di alimento poichè la depressurizzazione avviene troppo lentamente.

Ogni sottosistema del sistema primario riceve il valore della misura di pressione di uno dei quattro sensori previsti per ogni generatore di vapore e li confronta con un valore di set-pint fisso (Min1P). Viene comandato lo spegnimento se due almeno due valori di un qualsiasi generatore di vapore scendono sotto il valore di set-point.

Per livelli di potenza inferiore ad un set-point fissato, questa funzione è disattivata. Fig. 15 riporta uno schema semplificato del sistema.

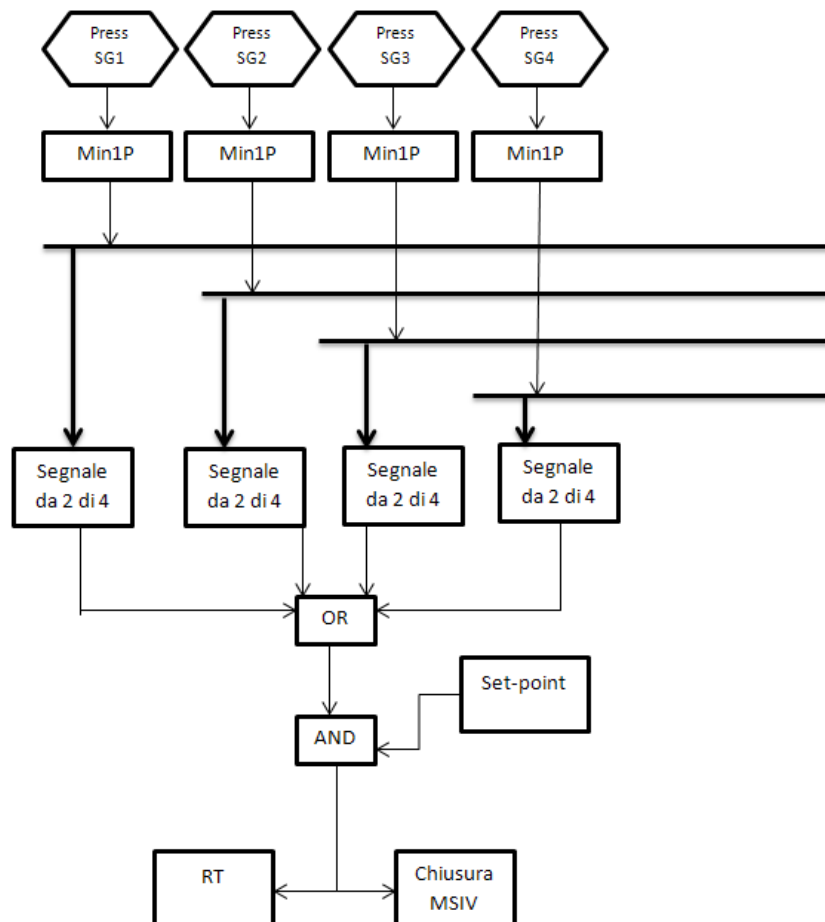



Fig. 15 – Bassa pressione nel generatore di vapore.

11.1.16 Spegnimento del reattore per alta pressione nel generatore di vapore

In caso di sovrappressione nel secondario è previsto lo spegnimento del reattore per impedire il danneggiamento del combustibile.
Ogni sottosistema del sistema di protezione riceve il valore della misura di pressione di uno dei quattro sensori previsti per ogni generatore di vapore e li confronta con un valore di set-pint fisso (Max1P). Viene comandato lo spegnimento se due almeno due valori di un qualsiasi die generatori di vapore eccedono il valore di il set-point. Questa funzione è sempre attiva. Fig. 16 riporta uno schema semplificato del sistema.

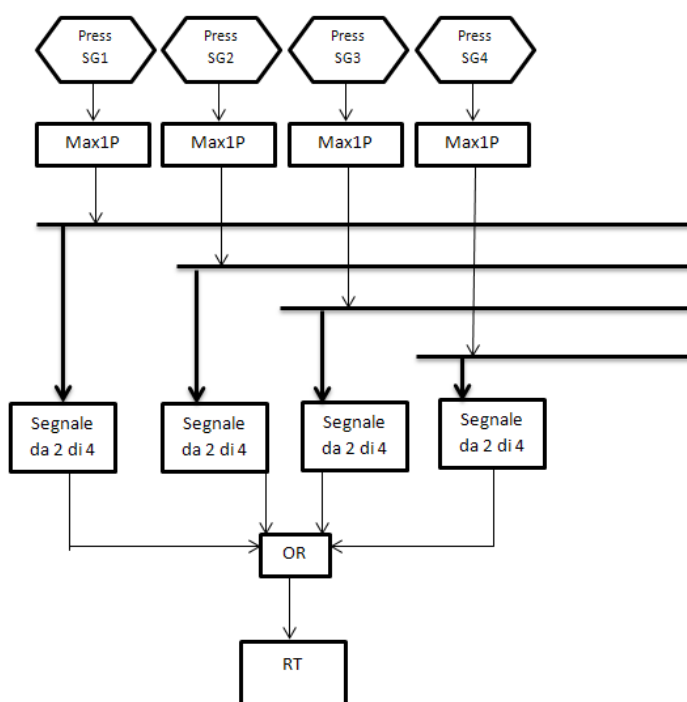



Fig. 16 – Alta pressione nel generatore di vapore.

11.1.17 Spegnimento del rattore perbasso livello nel generatore di vapore

Nel caso in cui si verifichi uno squilibrio tra richiesta di vapore e flusso di acqua di alimento tale da causare un abbassamento del livello nel generatore di vapore è previsto lo spegnimento del reattore per impedire il danneggiamento del combustibile.

Ogni sottosistema del sistema di protezione riceve il valore della misura di livello di uno dei quattro sensori previsti per ogni genratore di vapore e li confronta con un valore di set-pint fisso (Min1P). Viene comandato lo spegniemtno se due almeno due misure in un qualsiasi dei generatori di vapore scendono sotto il valore di il set-point.

Per livelli di potenza inferiore ad un set-point fissato, questa funzione è disattivata. Fig. 17Fig. 15 riporta uno schema semplificato del sistema.

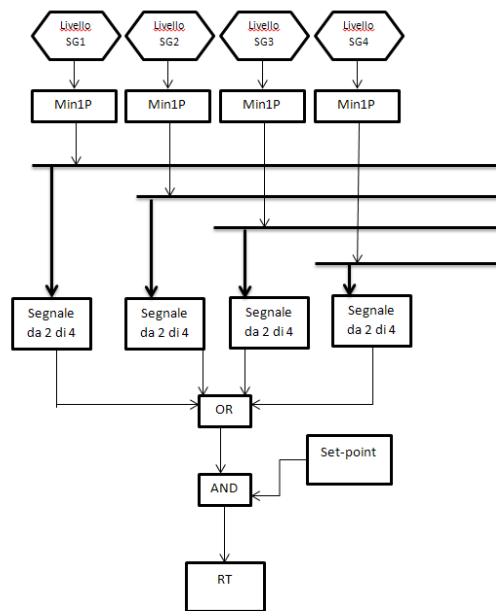



Fig. 17 – Basso livello nel generatore di vapore.

11.1.18 Spegnimento del reattore per alto livello nel generatore di vapore

Nel caso in cui si verifichi un aumento di livello nel generatore di vapore è previsto lo spegnimento del reattore per impedire il danneggiamento del combustibile a seguito di fenomeni legati al sottoraffreddamento del refrigerante primario. Lo spegnimento del reattore in caso di alto livello nel generatore di vapore serve anche a proteggere la turbina da un'eccessiva erosione dovuta a una vapore in ingresso dal titolo troppo basso.

Ogni sottosistema del sistema di protezione riceve il valore della misura di livello di uno dei quattro sensori previsti per ogni generatore di vapore e li confronta con un valore di set-pint fisso (Min1P). Viene comandato lo spegnimento del reattore se due almeno due misure in un qualsiasi generatore di vapore eccedono il valore di il set-point. Per livelli di potenza inferiore ad un set-point fissato, questa funzione è disattivata. Fig. 18Fig. 17Fig. 15 riporta uno schema semplificato del sistema.

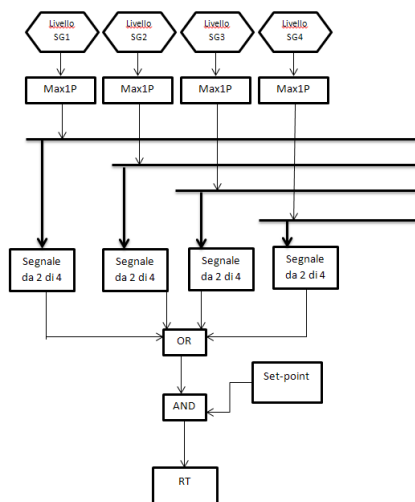



Fig. 18 – Alto livello nel generatore di vapore.

11.1.19 Spegnimento del reattore dovuto ad alta pressione nel contenimento.

Qualora si verifichi un aumento della pressione all'interno del contenitore primario a seguito di perdita di acqua o vapore è previsto lo spegnimento del reattore.
Il valore della pressione viene misurato da quattro sensori nel compartimento equipmente e quattro sensori ne comaprtimento di servizio. Ogni sottosistema di PS riceve un valore della misura di pressione relativo aogniuno dei due compartimenti e li confronta con un set-point fisso (Max1p). Viene comandato lo spegnimento se almeno due valori eccedono il set-point.
Questa funzione è sempre attiva. Fig. 19 riporta uno schema semplificato del sistema.

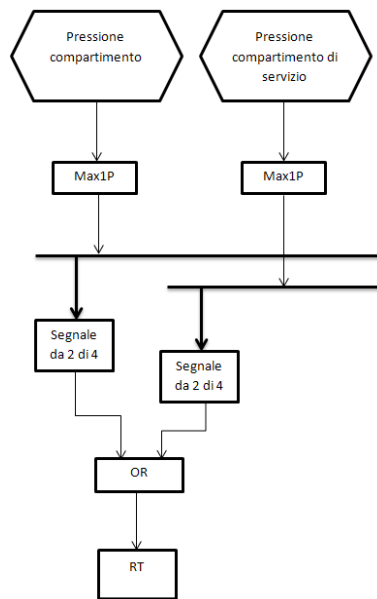



Fig. 19 – Alta pressione nel contenimento.

11.1.20 Spegnimento del reattore dovuto all'inserimento del sistema di iniezione di sicurezza.

Se il sustema di protezione determina l'avvio del sistema di iniezione di sicurezza è previsto lo spegnimento del reattore comandato dallo stesso sottosistema di protezione che ha avviato il sistema di iniezione di sicurezza.
Questa funzione è sempre attiva.

11.1.21 Spegnimento del reattore dovuto all'avvio del sistema di emergenza dell' acqua di alimento.

Qualora a causa del basso livello il sistema di protezione avvia il sistema di emergenza dell'acqua di alimento è previsto lo spegnimento del reattore. Lo stesso sottosistema del sistema di protezione che determina l'avvio del sistema di emergenza dell'acqua di alimento comanda lo spegnimento del reattore. Per livelli di potenza inferiore ad un set-point fissato, questa funzione è disattivata.

11.1.22 Spegnimento del reattore manuale

Lo spegnimento del reattore manuale è comandabile sia dalla sala di controllo principale che dalla stazione di spegnimento remota.

11.2 Sistemi I&C correlati allo spegnimento sicuro.

L'impianto è dotato di salvaguardie ingegneristiche (ESP) attivate dal sistema di protezione (PS) e controllate dal sistema automatico di sicurezza atte a garantire il raggiungimento dello stato di sottocriticità e mantenerlo nel tempo. Fanno parte delle ESP anche alcuni sistemi I&C.
E' possibile che in alcuni casi lo spegnimento del rattore non sia affidato ai sistemi di sicurezza, in tal caso è il sistema di processo automatico (PAS) che lo attiva.
I sistemi con funzioni di sicurezza possono essere gestiti sia dalla sala di controllo principale (MCR) che dalla stazione si spegnimento remota (RSS)

11.2.1 Spegnimento sicuro tramite sistemi di sicurezza

L'impianto può essere portato nella condizione di spegnimento "a freddo" utilizzando i soli sistemi di sicurezza anche ipotizzando il guasto casuale in un componente del sistema di sicurezza più influente (*single failure*) e la sola disponibilità di alimentazione elettrica interna o esterna all'impianto.

11.2.2 Sistema di emergenza per l'acqua di alimento

Il sistema di emergenza per l'acqua di alimento (EFWS) permette lo smaltimento del calore di decadimento tramite i generatori di vapoer (SG). Tale sistema permette inoltre il mantenimento dello stato di standby caldo.

11.2.2.1 Sistema di Fornitura del vapore principale.

Il sistema di fornitura del vapore principale permette il controllo della pressione nel secondario tramite la valvole di rilascio dal vapore di sicurezza (MSRT). Tramite queste il vapore viene rilasciato al di fuori dal contenimento,previa chiusura delle valvle di isolamento principali (MSIV) , nel caso in cui il condensatore sia fuori servizio smaltendo così di smaltire il calore. Tali valvole sono utilizzate anche per ridurre la pressione ad un valore tale da permettere l'intervento del sistema di rimozione del calore residuo (RHR)

11.2.2.2 Sistema di iniezione di sicurezza a media prevalenza

Tramite il sistema di iniezione a media prevalenza si può iniettare acqua fortemente borata nel sistema di refrigerazione del reattore (RCS) per contenere picchi di reattività. Se il sistema di borazione aggiuntivo (EBS) non è disponibile durante lo shutdown caldo o freddo è previsto l'utilizzo di questo sistema per aggiungere boro nel RCS.

11.2.2.3 Sistema di borazione aggiuntivo

Per garantire il margine di sottocriticità necessario durante la fase di spegnimento di sicurezza si può aggiungere acqua fortemente borata nel RCS tramite l'EBS.

11.2.2.4 Sistema di rimozione del calore residuo

Il sistema di rimozione del calore residuo (RHRS) permette di portare e mantenere l'impianto in una situazione di spegnimento freddo

11.2.2.5 Sistema di strumentazione fuori del nocciolo

La misurazione del flusso neutronico è effettuata grazie rilevatori operanti in campi diversi e parzialmente soprapposti tra di loro. I campi di misura sono tre, il campo di sorgente, il campo intermedio e quello di potenza

11.2.2.6 Sistema del refrigerante del reattore

Il RCS permette di refrigerare il nocciolo e depressurizzare il RCS stesso tramite gli SG in modo da raggiungere lo stato in cui l' RHRS può essere attivato per continuare la refrigerazione dell'impianto.

11.2.2.7 Generatori diesel di emergenza e ausiliari

Nel caso in cui venga a mancare l'alimentazione elettrica esterna l'impianto è dotato di quattro generatori diesel di emergenza (EDG) per alimentare i sistemi necessari allo spegnimento dell'impianto e al mantenimento di tale condizione.

11.2.2.8 Sistema dell'acqua di servizio necessaria

Lo scambio termico tra il sistema di refrigerazione dei componenti (CCWS) e il pozzo ultimo di calore è assicurato dal sistema dell'acqua di servizio necessaria (ESWS)

11.2.2.9 Sistema dell'acqua di refrigerazione dei componenti

Il sistema dell'acqua di refrigerazione dei componenti media lo scambio termico tra i vari componenti e l' ESWS

11.2.2.10 Sistema dell'aqua refrigerata di sicurezza

Il sistema dell'acqua refrigerata di sicurezza (SCWS) fornisce l'acqua refrigerata necessaria al sistema di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC) alle unità di refrigerazione degli ambienti necessari alla sicurezza dell'impianto e a due delle quattro serie dell' RHRS.

11.2.2.11 Sistema di riscaldamento ventilazione e condizionamento dell'aria

Il sistema di riscaldamento,ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC) assicura la giusta temperatura per i componenti e i sistemi per lo spegnimento sicuro. L' HVAC è composto dal sistema di condizionamento dell'aria della sala di controllo, il sistema di ventilazione dell'edificio del combustibile, il sistema di ventilazione dell'edificio dei generatori di emergenza, il sistema di ventilazione della zona controllata dell'edificio salvaguardia, il sistema di ventilazione della divisione elettrica dell'edificio salvaguardia.

11.2.2.12 Sistema di distribuzione della potenza

La potenza elettrica generata all'interno o all'esterno dell'impianto viene distribuita tra le utenze necessaria allo spegnimento sicuro dal sistema di distribuzione della potenza.

11.2.3 Sistema di spegnimento sicuro dopo incendi

I sistemi di spegnimento sicuro dopo un incendio sono scelti ipotizzando che l'incendio danneggi tutti i componenti interessati da questo, ad eccezzione della MCR e del contenimento, e che non sia possibile ripararli. Questi sono tali da garantire lo spegnimento sicuro dell'impianto.

11.2.3.1 Sistema principale dell'acqua di alimento

Questi circuiti possono o no essere sistemi di sicurezza. In caso di funzionamento spurio delle pompe dell'acqua di alimentazione principale, è necessario avere la capacità di isolare il sistema stesso, per prevenire il possibile sovra raffreddamento del generatore di vapore.

11.2.3.2 Sistema di controllo chimico e di volume

Il sitema di controllo chimico e di volume (CVCS) non è propriamente un sistema di sicurezza, infatti serve a controllare la reattività ed a trattare il refirgerante durante il normale funzionamento. Può tuttavia essere utilizzato in sostituzione del EBS

11.2.3.3 Sistema di raffreddamento della piscina del combustibile

L'acqua della piscina dove viene stoccato il combustibile esausto è refrigerata dal sistema di refrigerazione della piscina del combustibile (FPCS). Questo sistema è incluso tra i sistemi di spegnimento dopo un incendio in quanto tale evento deve essere considerato anche in questa zona dell'impianto.

11.2.3.4 Stazione di spegnimento remota

La stazione di spegnimento remota (RSS) permette di spegnere l'impianto da una zona completamente indipendente dalla MCR. La RSS, inoperabile se la MCR è disponibile, è situata nell'edificio salvaguardia ed è utilizzata qualora sia necessario evaquare la MCR.

11.2.3.5 Spegnimento sicuro per station blackout

Le attrezzature per lo spegnimento sicuro durante l'interruzione di alimentazione elettrica della stazione si basano sul soddisfacimento delle stesse funzioni delineate nel 10 CFR 50.36 e della RG 1.155.

11.3 Acronimi

Acronimi	Descrizione	Descrizione originale
ALU	Unità Attuazione e Logica	Actuation & Logic Unit
Amps	Ampere	Ampere
APU	Unità Acquisizione ed Elaborazione	Acquisition & Processing Unit
Aux	Ausiliario	Auxiliary
CI	Isolamento di Contenimento	Containment Isolation
CI-V	Valvola di Isolamento di Contenimento	Containment Isolation Valve
Cleg	Gamba Fredda	Cold Leg
Cls	Chiusura	Close
CPL	Livello di Potenza del Nocciolo	Core Power Level
CRDM	Meccanismo di Movimentazione delle Barre di Controllo	Control Rod Drive Mechanism
C-V	Valvola di Controllo	Control Valve
CVCS	Sistema di Controllo Chimico e di Volume (KBA)	Chemical and Volume Control System (KBA)

Acronimi	Descrizione	Descrizione originale
DEGV	Tensione Degradata	Degraded Voltage
Div	Divisione	Division
DNB	Distacco dall'Ebollizione Nucleata	Departure from Nucleate Boiling[13]
DNBR	Rapporto di Distacco dall'Ebollizione Nucleata	Departure from Nucleate Boiling Ratio[14]
dP	Pressione Differenziale	Differential Pressure
DT	Tempo di Raddoppio	Doubling Time
D-V	Valvola di Drenaggio	Drain Valve
EDG	Generatore Diesel di Emergenza	Emergency Diesel Generator
EFW	Acqua Alimento di Emergenza	Emergency Feedwater
EFWS	Sistema Acqua Alimento di Emergenza	Emergency Feedwater System
Ex	Esercizio	Exercise
FCV	Valvola di Controllo di Portata	Flow Control Valve
FLD	Pieno Carico	Full Load
FST	Veloce	Fast
HL	Gamba Calda	Hot Leg
HLEG	Gamba Calda	Hot Leg
HLPD	Densità di Potenza Lineare Alta	High Linear Power Density
IMB	Disequilibrio	Imbalance
IRD	Rilevatore di Intervallo Intermedio	Intermediate Range Detector
I-V	Valvola di Isolamento	Isolation Valve
LCV	Valvola di Controllo di Livello	Level Control Valve
LLD	Basso Carico	Low Load
LOOP	Perdita di Potenza fuori dal Sito	Loss of Offsite Power
LOV	Perdita di Tensione	Loss of voltage
LPD	Densità di Potenza Lineare	Linear Power Density
Max	Massimo	Maximum
MaxRD	Massima Discesa di Barra	Maximum Rod Drop
MCR	Sala di Controllo Principale	Main Control Room
MFW	Acqua Alimento Principale	Main Feedwater
Min	Minimo	Minimum
MS	Vapore Principale	Main Steam
MSIV	Valvola di Isolamento del Vapore Principale	Main Steam Isolation Valve

[13] The point at which the heat transfer from a fuel rod rapidly decreases due to the insulating effect of a steam blanket that forms on the rod surface when the temperature continues to increase (http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/departure-from-nucleate-boiling-dnb.html)

[14] The ratio of the heat flux needed to cause departure from nucleate boiling to the actual local heat flux of a fuel rod (http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/departure-from-nuclear-boiling-ratio-dnbr.html)

Acronimi	Descrizione	Descrizione originale
MSRCV	Valvola di Controllo del Vapore Principale	Main Steam Relief Control Valve
MSRIV	Valvola di Isolamento del Vapore Principale	Main Steam Relief Isolation Valve
MSRT	Sistema di Emergenza del Vapore Principale	Main Steam Relief Train
NF	Flusso Neutronico	Neutron Flux
Norm	Normale	Normal
NR	Intervallo Ristretto	Narrow Range
PICS	Sistema di Informazione e Controllo di Processo	Process Information and Control System
PIL V	Valvola Pilota	Pilot Valve
PRD	Rilevatore di Intervallo di Potenza	Power Range Detector
Press	Pressione	Pressure
Psat	Pressione di Saturazione	Saturation Pressure
PSRV	Valvola di sicurezza del pressurizzatore	Pressurizer Safety Relief Valve
PZR	Pressurizzatore	Pressurizer
QROC	Velocità di Variazione di Flusso	Flux Rate of Change
QUAL	Qualità	Quality
RAU	Unità di Acquisizione Remota	Remote Acquisition Unit
RCCA	Insieme di barre di controllo	Rod Cluster Control Assembly
RCPS	Velocità della Pompa del Refrigerante del Reattore	Reactor Coolant Pump Speed
RCP	Pompa del Refrigerante del Reattore	Reactor Coolant Pump
RD	Discesa Barra	Rod Drop
RT	Spegnimento del Reattore	Reactor Trip
SAS	Sistema di Automazione di Sicurezza	Safety Automation System
SAT	Saturazione	Saturation
SI	Iniezione di Sicurezza	Safety Injection
SICS	Sistema di Informazione e Controllo di Sicurezza	Safety Information and Control System
SIS	Sistema di Iniezione di Sicurezza	Safety Injection System
SG	Generatore di Vapore	Steam Generator
SGPD	Caduta di Pressione del Generatore di Vapore	Steam Generator Pressure Drop
SOV	Valvola a Solenoide	Solenoid Operated Valve
SP	Riferimento (“Set Point”)	Set Point
SPND	Rilevatore di Neutroni Auto-alimentato	Self Powered Neutron Detector
SSS	Sistema di Avviamento e Spegnimento	Startup Shutdown System
TDEGV	Ritardo di Tempo – Tensione Degradata	Time Delay – Degraded Voltage
TEMP	Temperatura	Temperature
TLOV	Ritardo di Tempo – Perdita di Tensione	Time Delay – Loss of Voltage
U.V.Coil	Bobina di sottotensione	Under Voltage Coil
VLLD	Carico molto Basso	Very Low Load
VCT	Serbatoio di Controllo di Volume	Volume Control Tank
WR	Intervallo Ampio	Wide Range

11.4 Riferimenti

[1] AREVA Design Control Document, U.S. EPR FINAL SAFETY ANALYSIS REPORT, CHAPTER 7—INSTRUMENTATION AND CONTROLS", revision 2.